

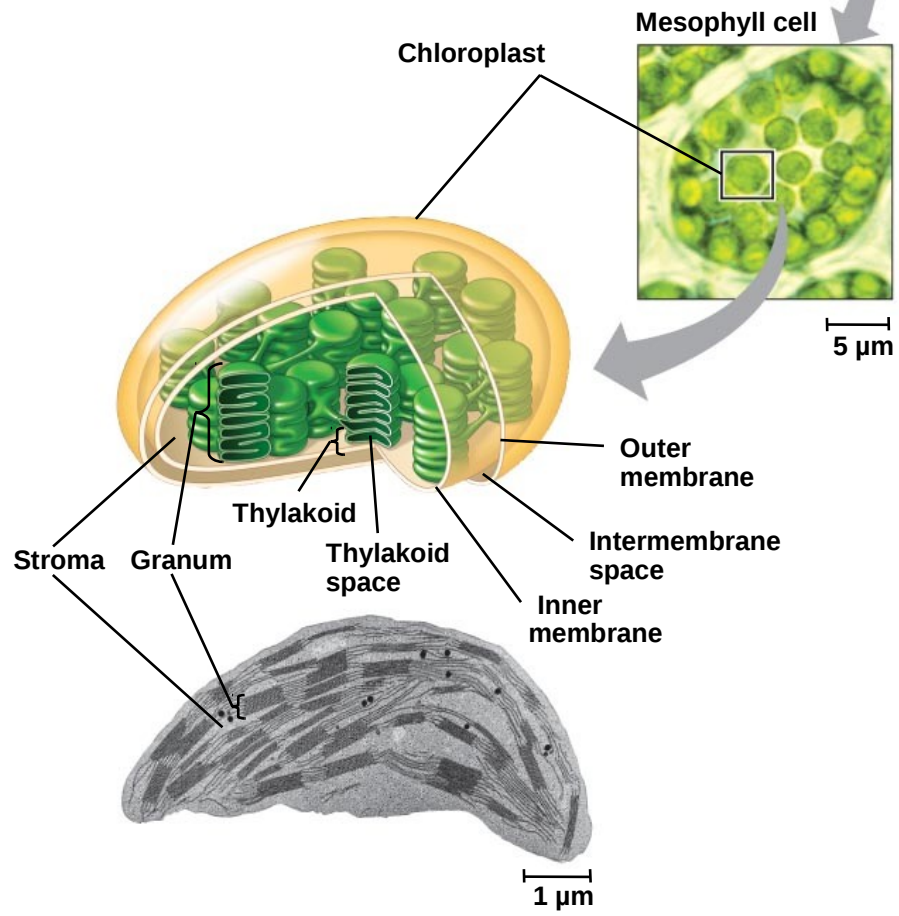
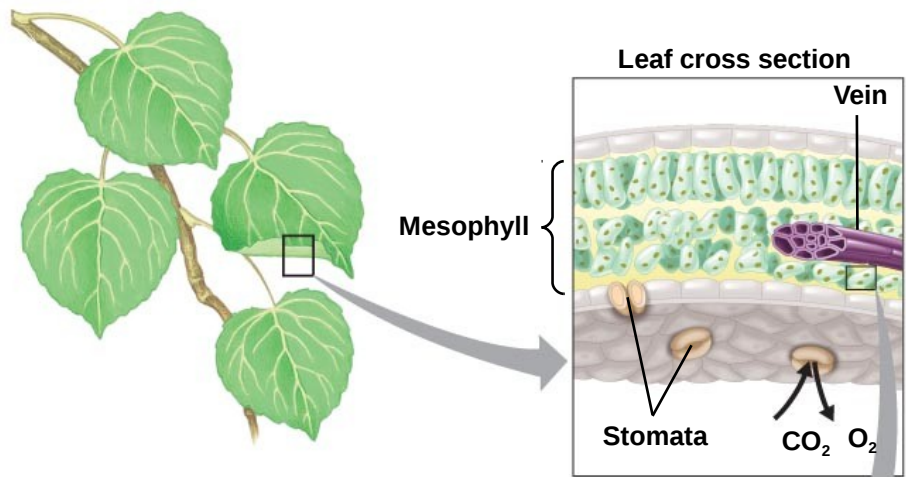
La fotosíntesi



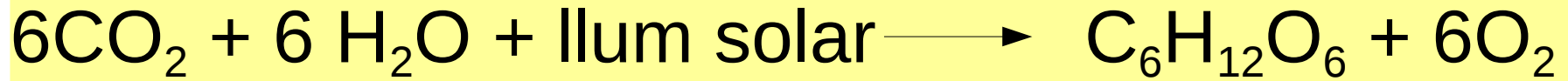


La fotosíntesi: concepte

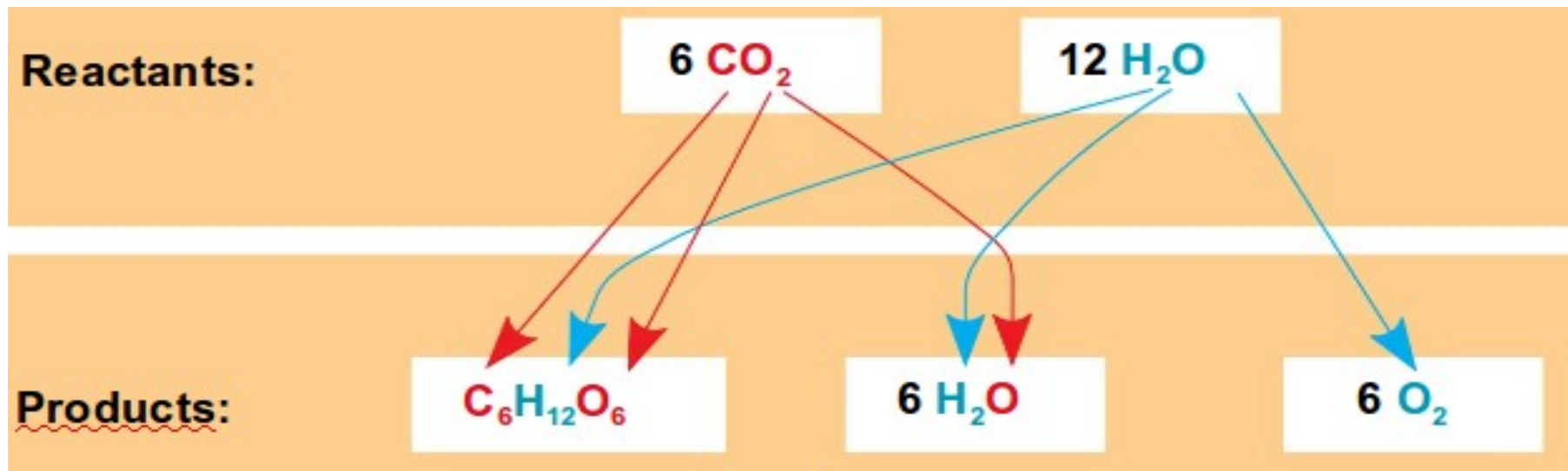
- Fa uns tres mil milions d'anys, una combinació de molècules que absorben llum i d'enzims, va permetre a una cèl·lula bacteriana **transformar l'energia lluminosa del sol en l'energia química** dels enllaços carboni-carboni i carboni-hidrogen dels sucres. Aquest procés d'usar la llum del sol per produir hidrats de carboni es coneix amb el nom de fotosíntesi.
- **La fotosíntesi és un procés anabòlic autòtrof mitjançant el qual determinats organismes, a partir del CO_2 i de l' H_2O , i amb la incorporació d'energia lluminosa del sol, aconsegueixen obtenir sucres amb despreniment d'oxigen.**



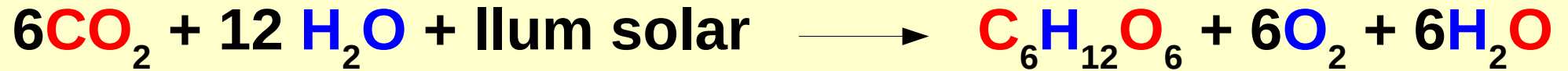
- La reacció simplificada de la fotosíntesi per a l'obtenció d'una molècula de glucosa és:



Durant molts anys es va interpretar que l'oxigen que es desprenia de la reacció procedia del CO_2 atmosfèric, la qual cosa és bastant lògica si es considera que per cada molècula de CO_2 es desprèn un altra de O_2 . Actualment i segons la hipòtesi de Van Niel s'ha demostrat que l'oxigen després procedeix de la molècula de l' H_2O .

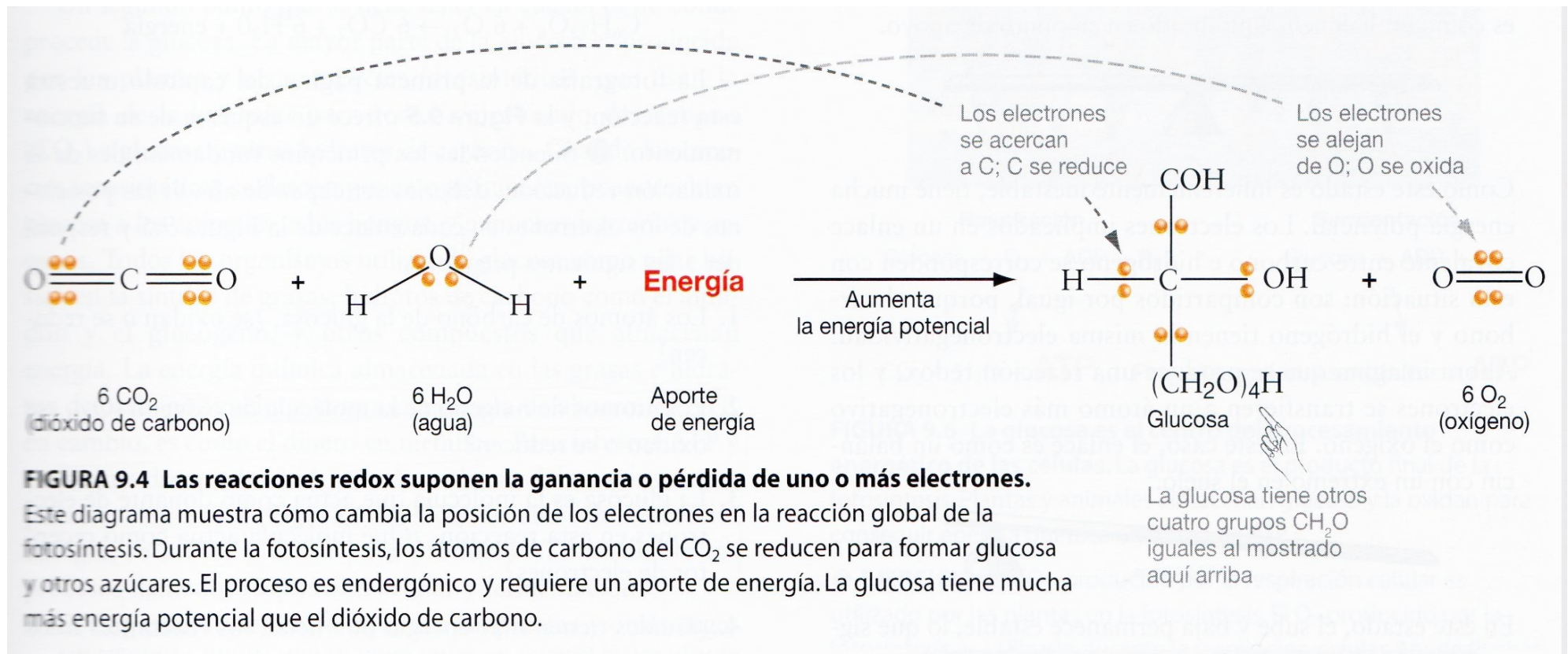


- D'acord amb això la reacció global de la fotosíntesi és més correcta expressar-la de la forma següent:



Aquesta reacció és molt global, ja que entre els reactants inicials (CO_2 i H_2O) i els finals (matèria orgànica i O_2) hi ha nombroses reaccions intermèdies.

- **En termes bioquímics**, la fotosíntesi consisteix en una reducció del CO_2 i en una oxidació de l' H_2O .
- Mitjançant un conjunt de transportadors d'electrons els electrons de l' H_2O passen al carboni del CO_2 .
- En algun moment d'aquest transport es fa necessari l'activació per la llum.

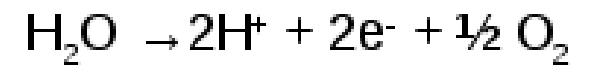


- **En plantes, algues i cianobacteris**, l' H_2O actua com a donador d'electrons. Es parla de fotosíntesi oxigènica perquè hi ha despreniment d'oxigen.
- **En bacteris fotosintètics (bacteris porprats i verds del sofre)**, el procés no té com a donador d'electrons a l'aigua ja que la majoria són anaeròbics estrictes i si en el procés es desprengués oxigen, moririen. Utilitzen com a donadors d'electrons altres compostos inorgànics com el sulfur d'hidrogen (H_2S). En aquest cas es parla de fotosíntesis anoxigènica perquè no genera oxigen.
- El CO_2 , és l'acceptor principal de tots els organismes autòtrofs fotosintètics (tot i que no és l'únic).

Fotosíntesi

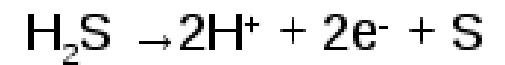
Oxigènica

Plantes superiors, algues i cianobacteris. El donador d'electrons és l'aigua i per tant **es desprèn O₂**;



Anoxigènica

Bacteris porprats i verds del sofre. El donador d'electrons és generalment sulfur d'hidrogen, H₂S; per tant **no es desprèn O₂**;





(a) Plants



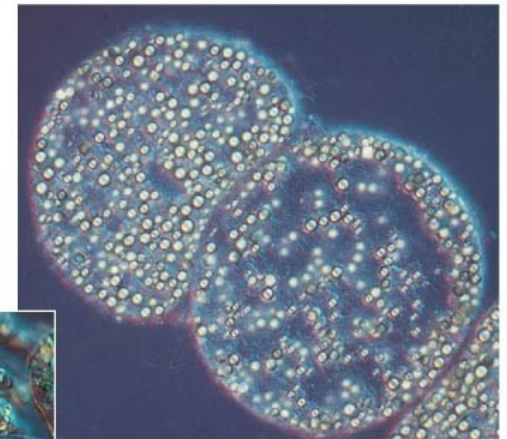
(b) Multicellular algae



(c) Unicellular protist $10\ \mu\text{m}$



(d) Cyanobacteria $40\ \mu\text{m}$

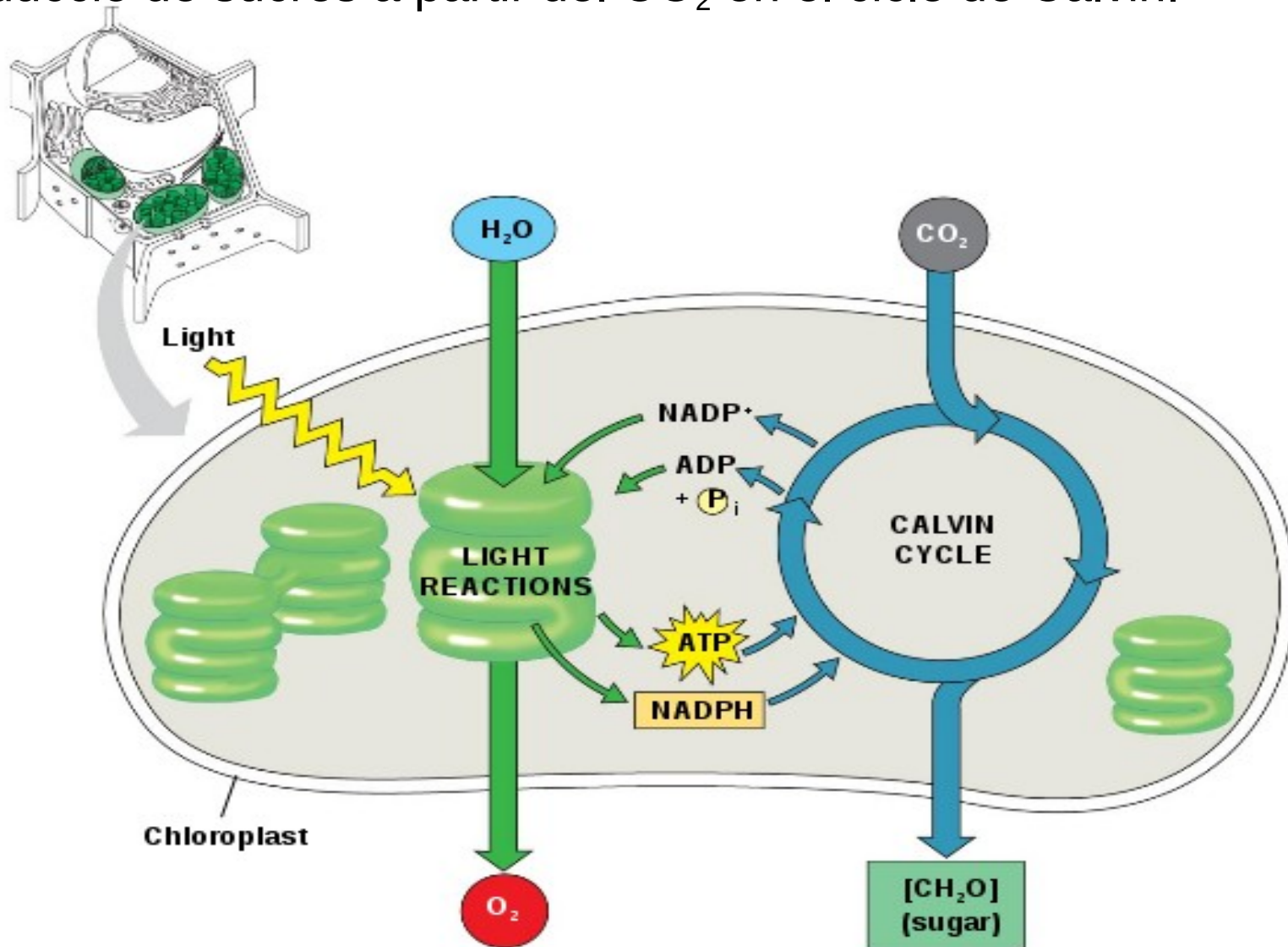


(e) Purple sulfur bacteria $1.5\ \mu\text{m}$

La fotosíntesi: dos grups de reaccions connectades.

- En el procés de la fotosíntesis es poden distingir dos conjunts de reaccions:
 - **Fase Iluminosa o fase fotoquímica**, conjunt de reaccions que s'activen per la llum
 - **Fase biosintètica, cicle de Calvin o fase fosca**, aquest grup de reaccions no necessiten llum directament però precisa dels productes generats en les reaccions dependents de la llum.

- La conversió del CO_2 en sucres es produeix durant la fase fosca de la fotosíntesi. En la fase lluminosa té lloc la descomposició de l'aigua, es desprèn oxigen i es generen els compostos necessaris perquè tingui lloc la producció de sucres a partir del CO_2 en el cicle de Calvin.



- La fase lluminosa de la fotosíntesi necessita llum i es dona en la **membrana dels tilacoides**. La molècula d'aigua es trenca (s'oxida). Els electrons procedents de l'oxidació de l'aigua són transferits fins un acceptor, el NADP⁺ (coenzim transportador d'electrons, molt abundant en les cèl·lules fotosintètiques,) que es reduït a NADPH.

Fotòlisi de l'aigua:



cadena de transport d'electrons fotosintètica
(llum)

Reducció del NADP:



Fotòlisi de l'aigua:



cadena de transport d'electrons fotosintètica
(llum)

Reducció del NADP:

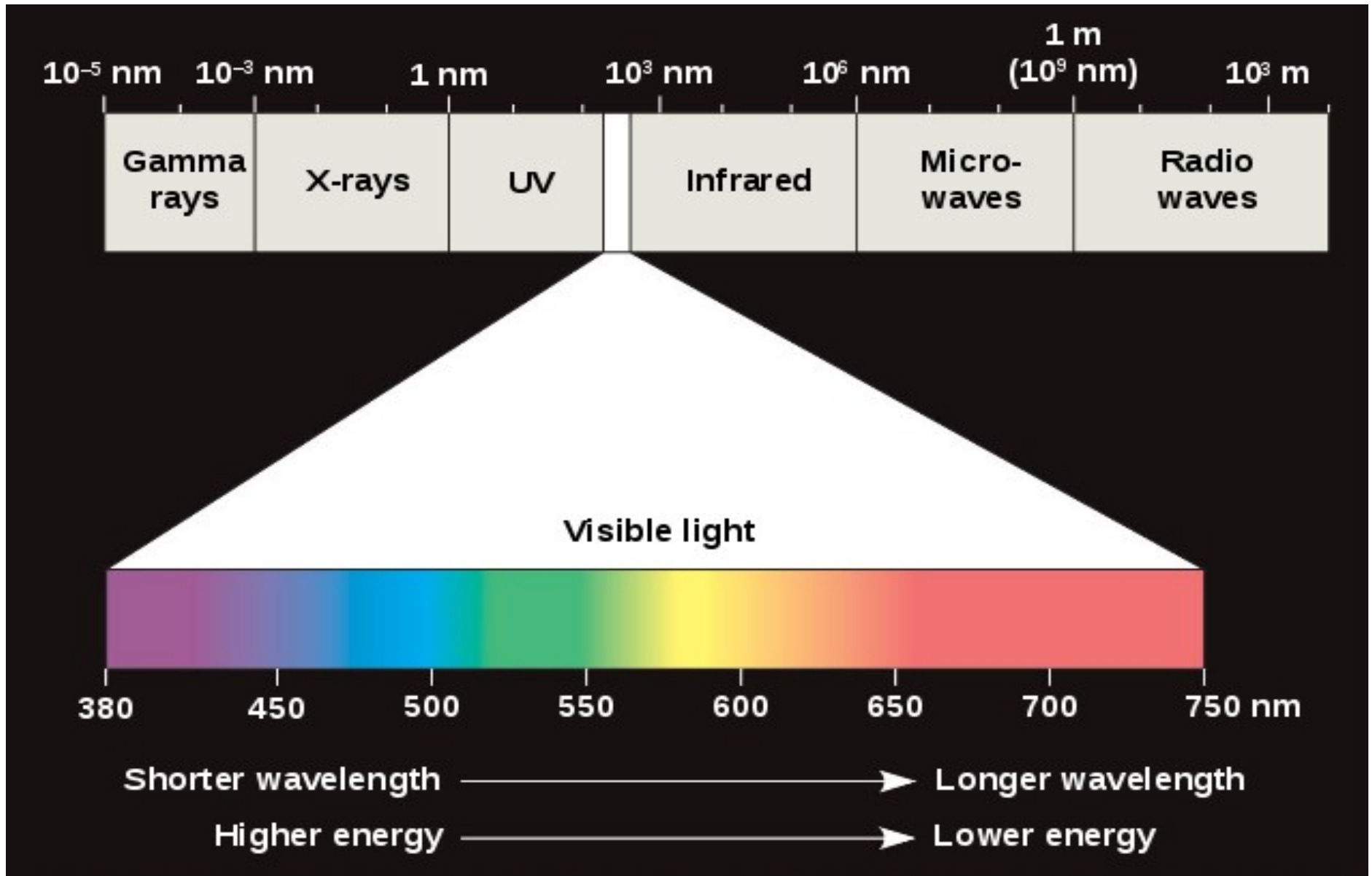


- El transport d'electrons des de l'aigua al NADP^+ es realitza mitjançant diversos transportadors d'e- com citocroms, quinones, proteïnes amb ferro i sofre, etc.
- Aquest transport d'electrons **no pot tenir lloc de forma espontània** (ja que es realitza en contra d'un gradient de potencial de reducció), ha d'haver un aport d'energia.
- És l'energia lluminosa la que permetrà que els e- es desplacin per la cadena de transport en contra del gradient de potencial (durant la fase lluminosa els electrons són excitats i "ascendits" a un estat d'alta energia per la llum).
- Una part de l'energia perduda pels e- durant el seu transport per la cadena fotosintètica es recuperada en la fosforilació de molècules d'ADP a ATP. Aquest procés s'anomena **fotofosforilació oxidativa** i participa una **ATP sintetasa**.
- L'absorció de llum per part de les plantes que permetrà excitar els electrons en la cadena fotosintètica transportadora d'electrons es dona mitjançant els **pigments fotosintètics**, que són molècules específiques en l'absorció de llum solar.
- La fase lluminosa de la fotosíntesi tal com veurem més endavant es presenta en dues modalitats: **amb transport acíclic d'electrons** i **amb transport cíclic d'electrons**.

- **La fase fosca o cycle de Calvin** es desenvolupa en l'**estroma** del cloroplast. Les reaccions químiques que tenen lloc en aquesta fase no necessiten llum.
- En aquesta segona etapa de la fotosíntesi, els electrons del NADPH i l'energia potencial de l'ATP generats durant la fase lluminosa s'usen per efectuar la reducció del CO₂ a carbohidrats.
- La fase fosca de la fotosíntesi regenera el NADP⁺ que podrà ser usat de nou en la fase lluminosa.

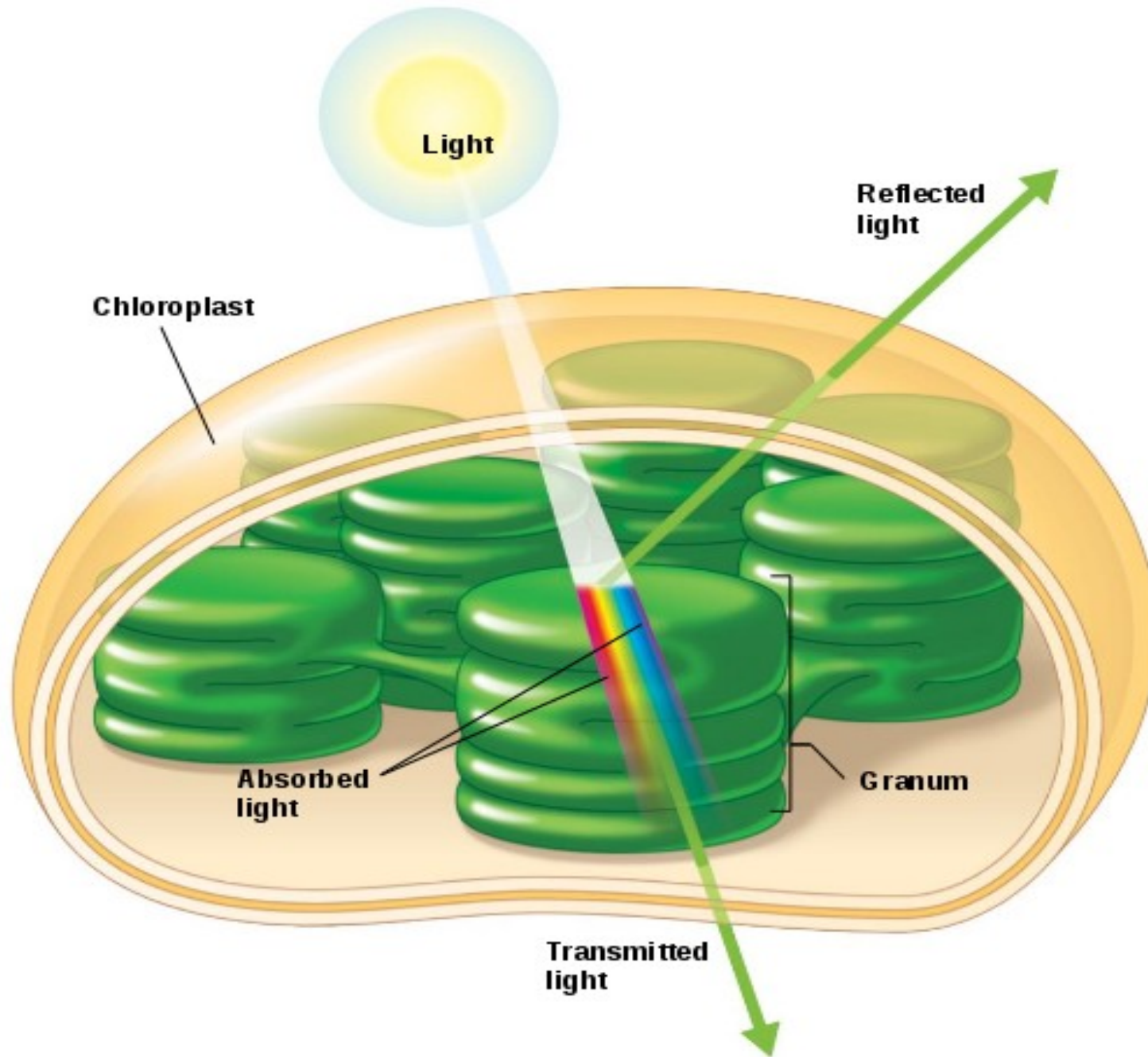


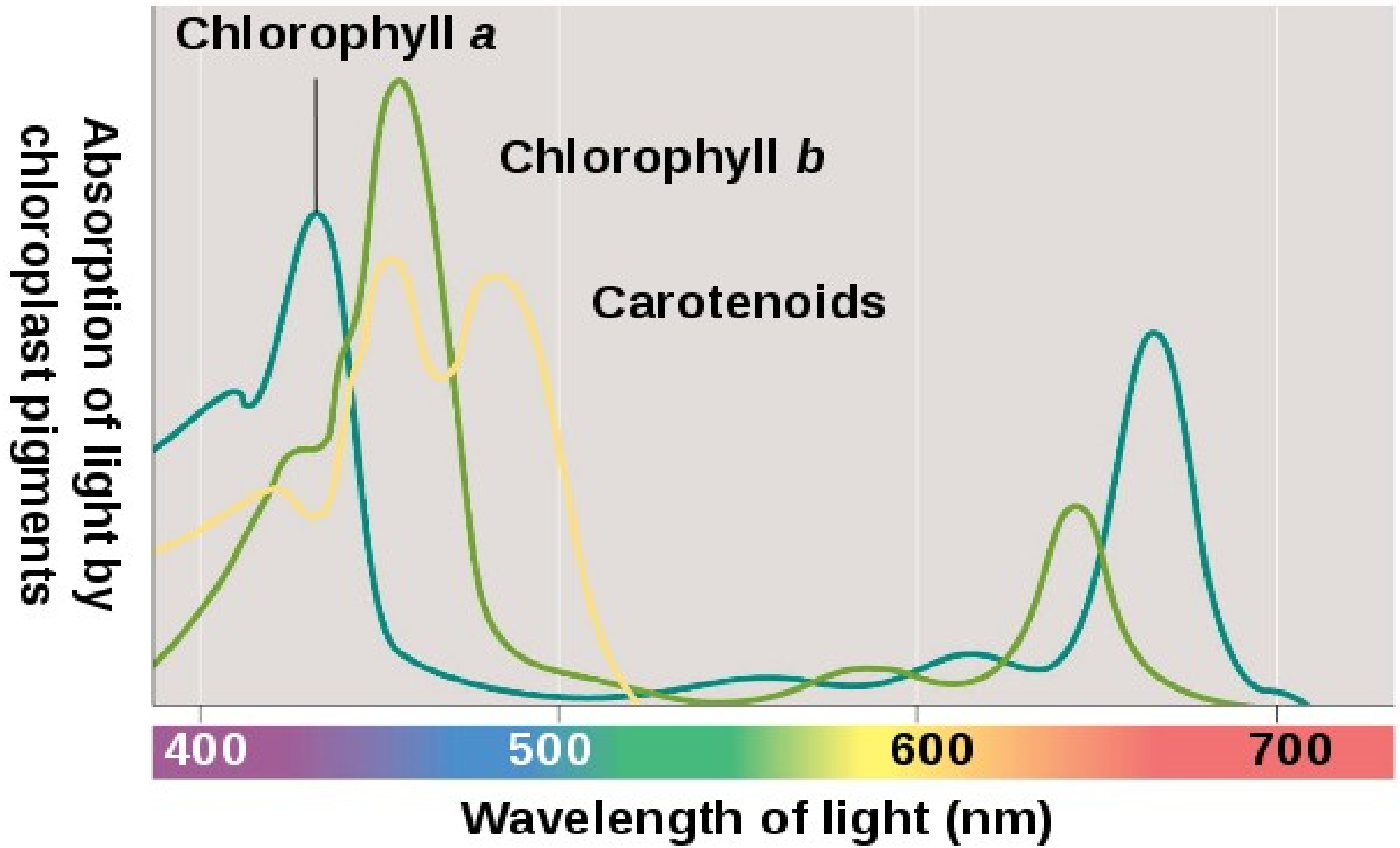
La naturalesa de la llum solar



Espectre electromagnètic

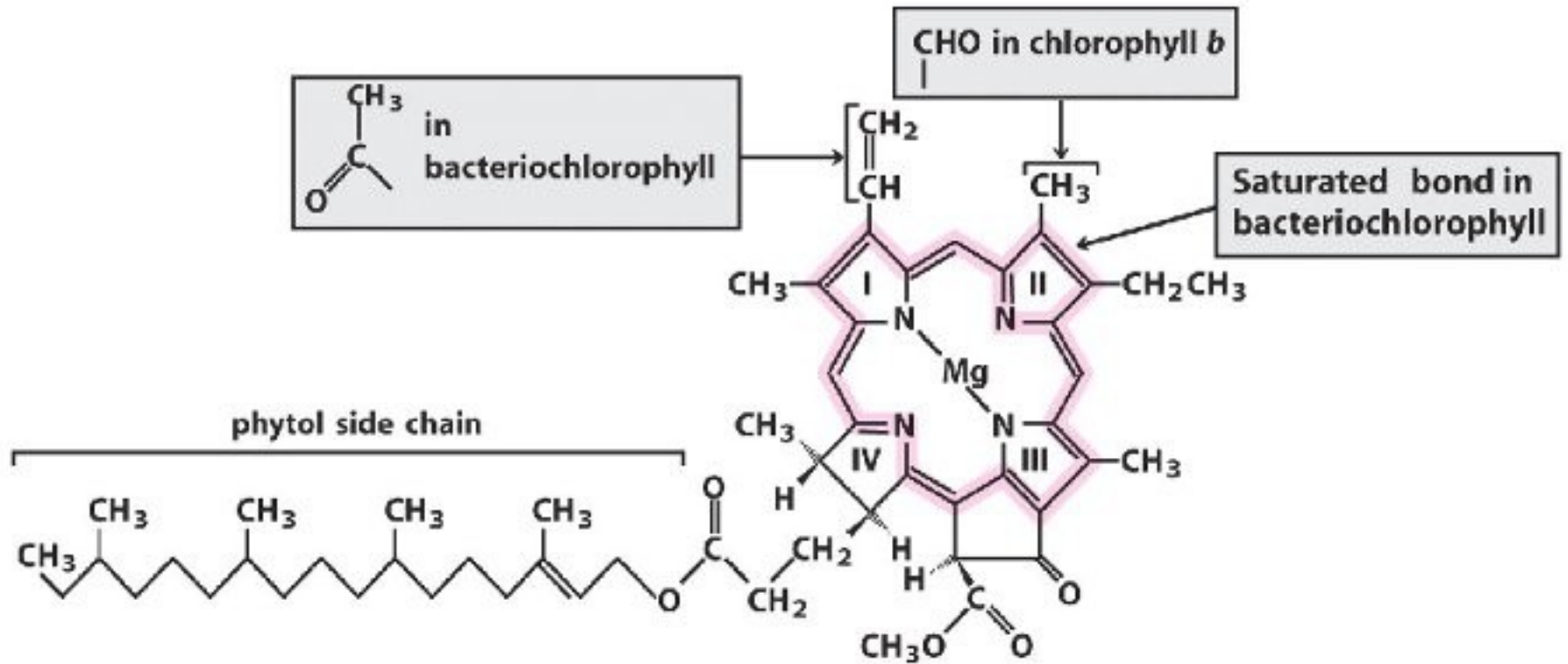
Pigments fotosintètics. Absorció de llum



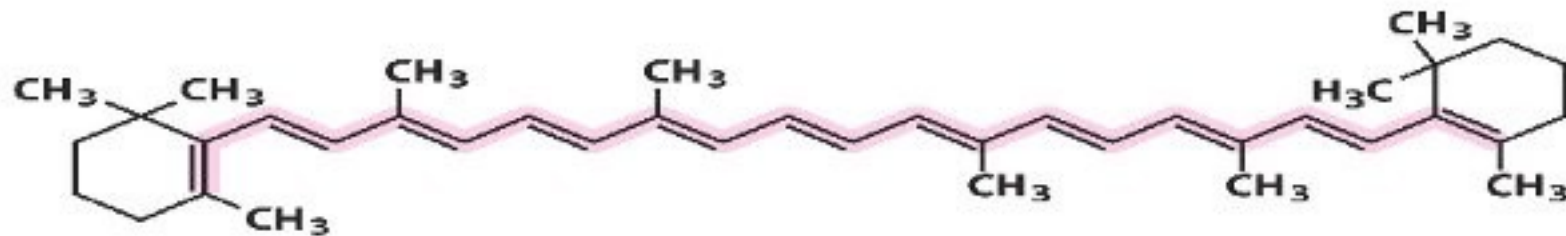


Absorption spectra

Estructura dels pigments

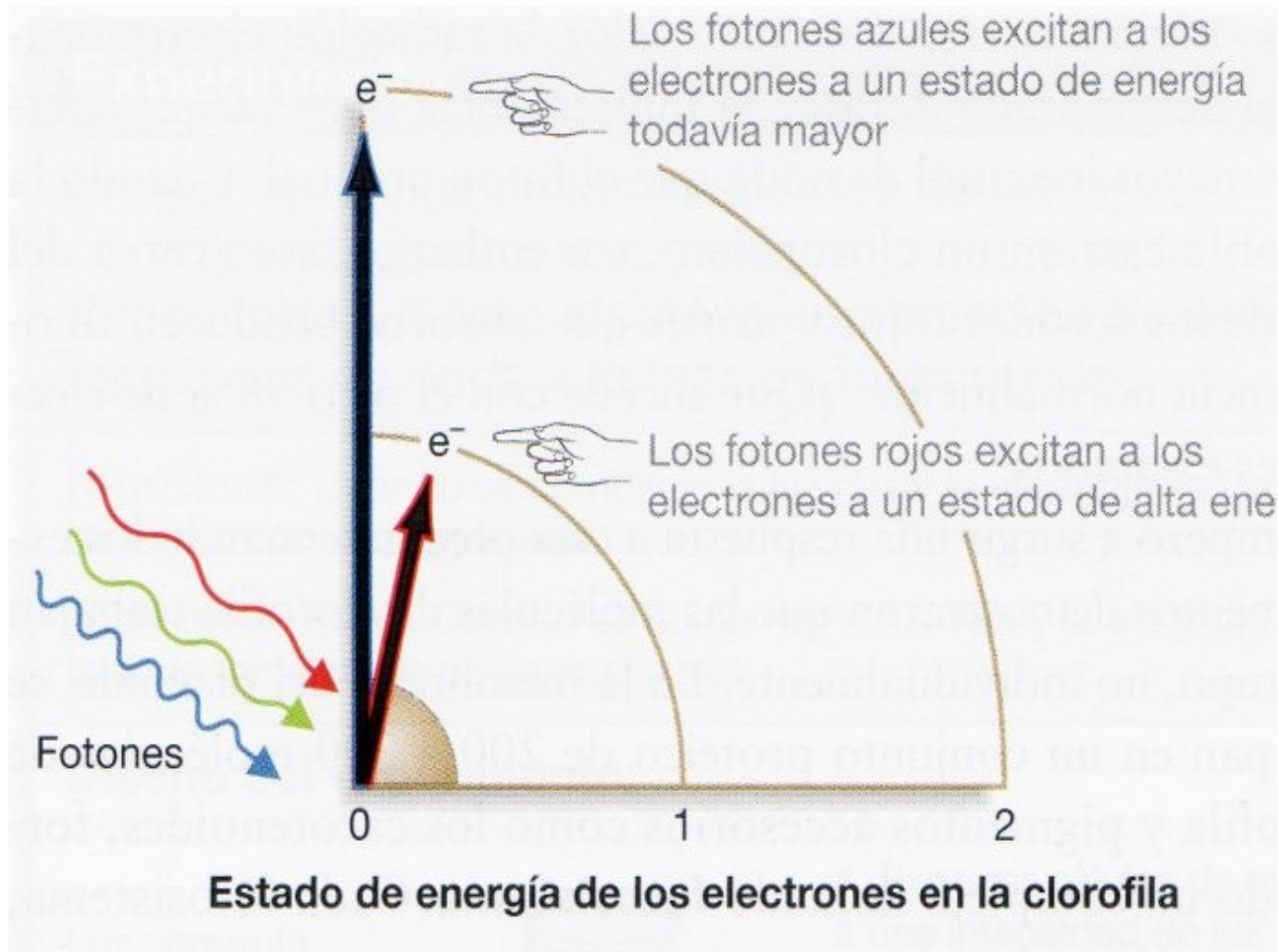


Chlorophyll *a*



β -Carotene

Excitació de la clorofil·la per la llum



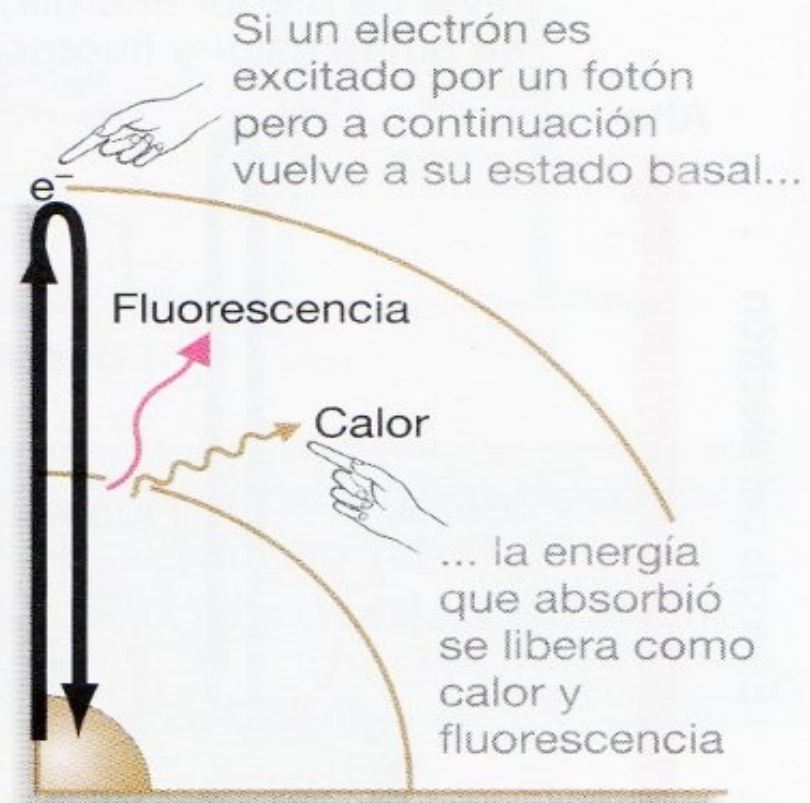
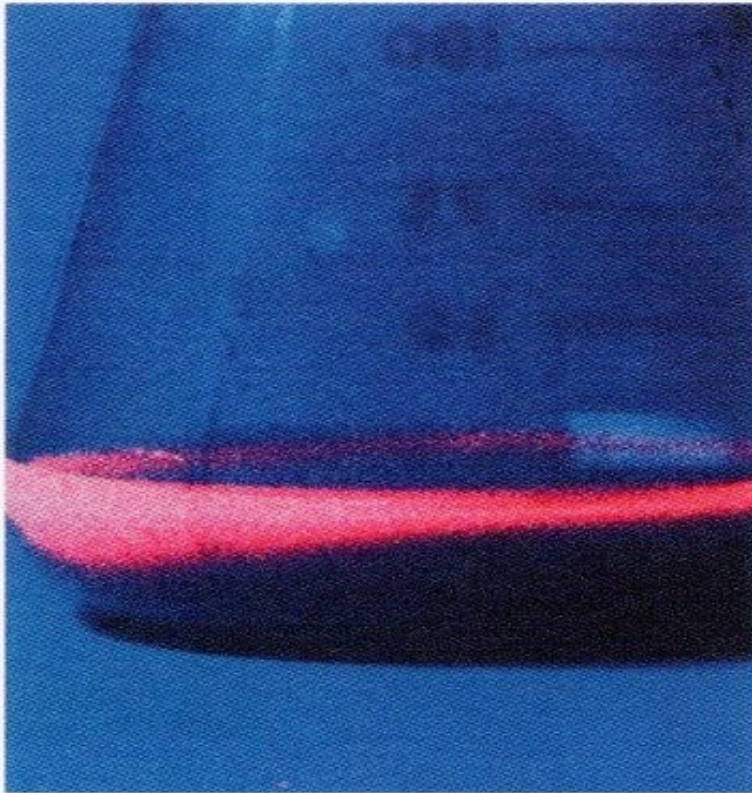
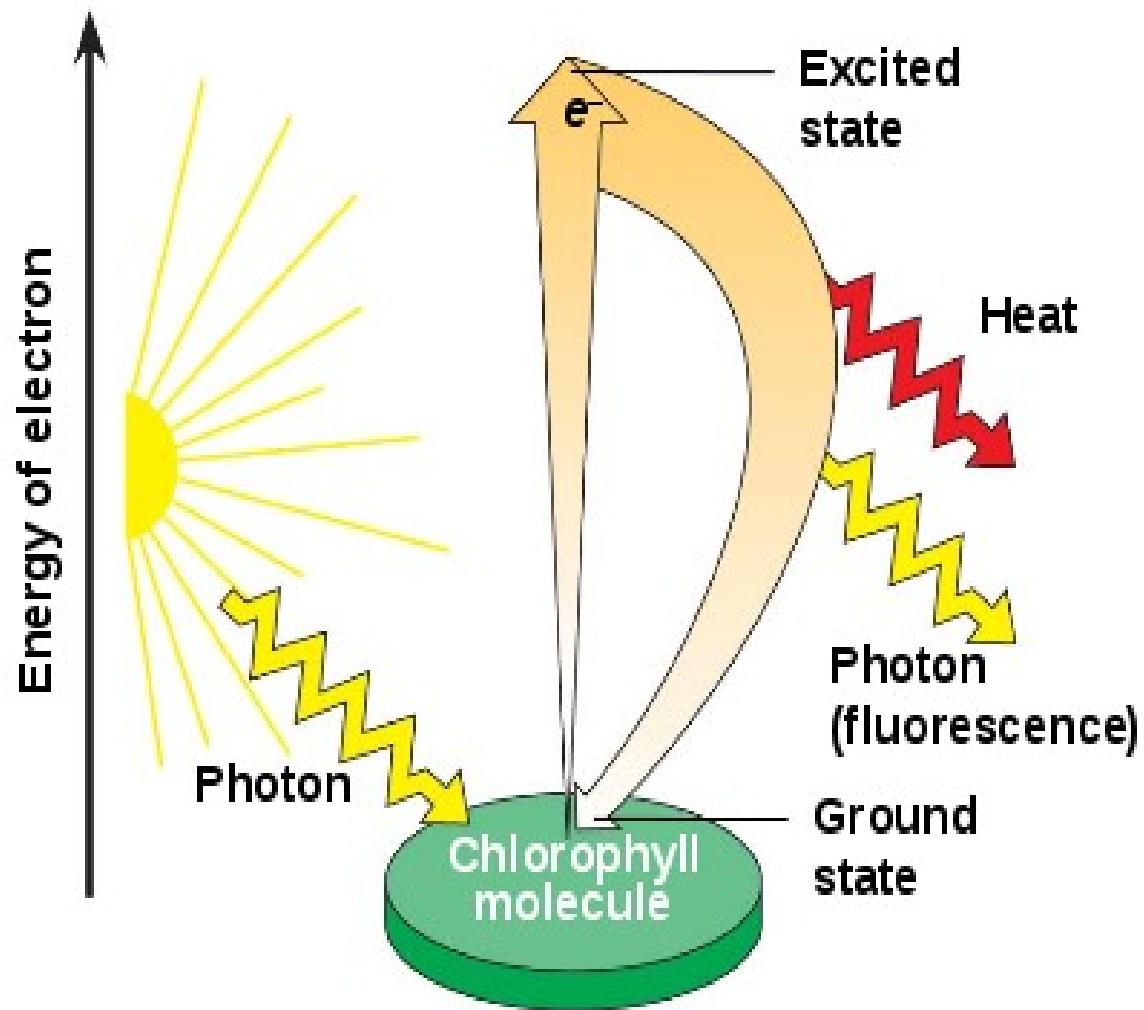
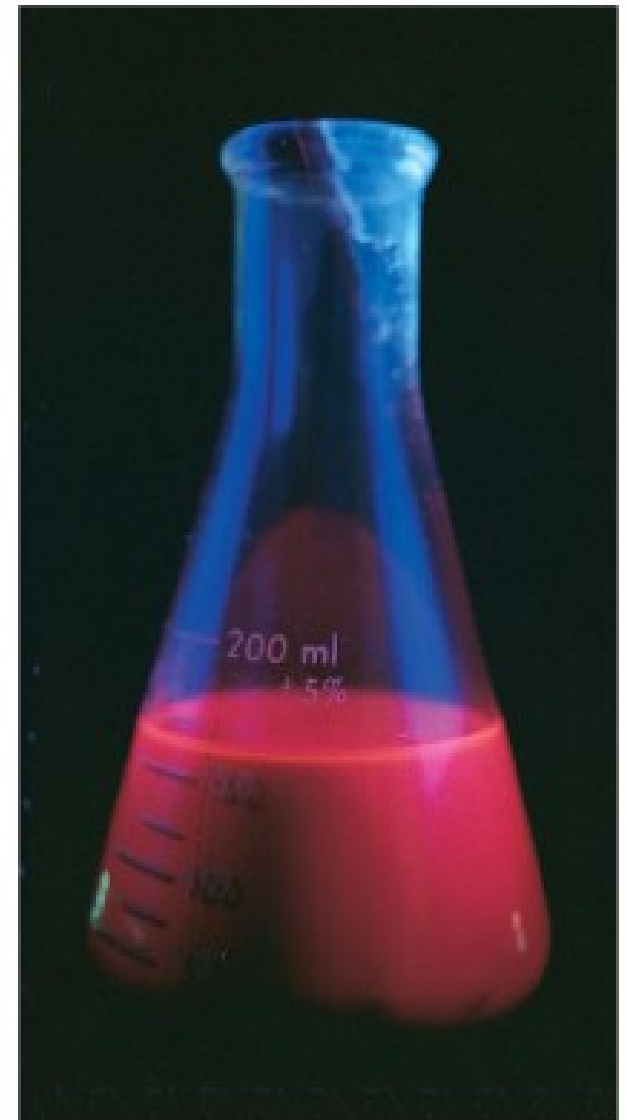


FIGURA 10.10 La fluorescencia se produce cuando los electrones excitados vuelven a su estado basal. Una solución pura de clorofila expuesta a luz ultravioleta. Los electrones son excitados a un estado de alta energía pero inmediatamente vuelven a un estado de baja energía, emitiendo fotones rojos y calor.

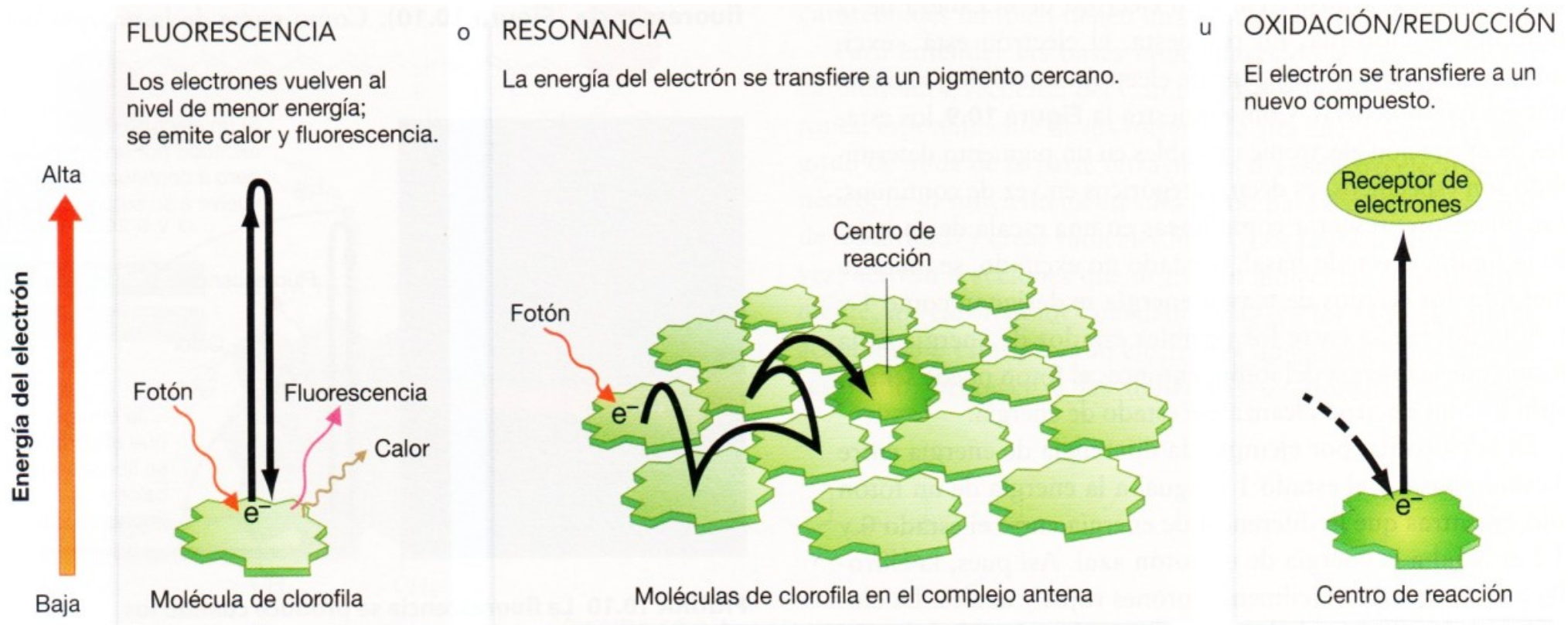


(a) Excitation of isolated chlorophyll molecule



(b) Fluorescence

L'excitació de la clorofil·la en els cloroplasts



La figura resumeix com la clorofil·la interacciona amb la llum solar il·lustrant els tres possibles destins dels electrons excitats pels fotons en els pigments fotosintètics: Poden (1) tornar a un nivell de baixa energia i produir fluorescència, (2) excitar un electró d'un pigment proper i induir ressonància, o (3) transferir-se a un receptor d'electrons en una reacció redox. La fluorescència és característica dels pigments aïllats, la ressonància té lloc en els pigments del complex antena, i la reacció redox es produeix en els pigments del centre de reacció.

Els fotosistemes

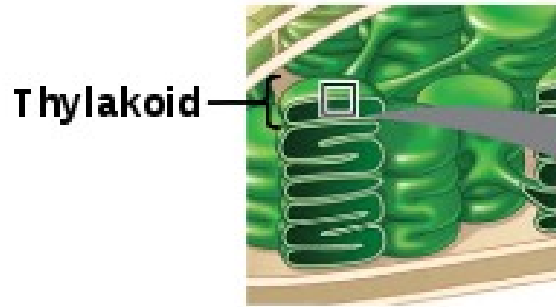
Els fotosistemes: són un conjunt de molècules englobades en unes proteïnes transmembrana en la bicapa lipídica de les membranes del tilacoide dels cloroplasts, estan destinats a captar la llum solar i iniciar la reacció:

- Antena (LHC): hi ha més pigments que proteïnes, no tenen pigment diana.
- Centre de reacció (CC): predominen les proteïnes, és on es troba el pigment diana.

Els **pigments fotosintètics dels fotosistemes** poden ser de dos tipus:

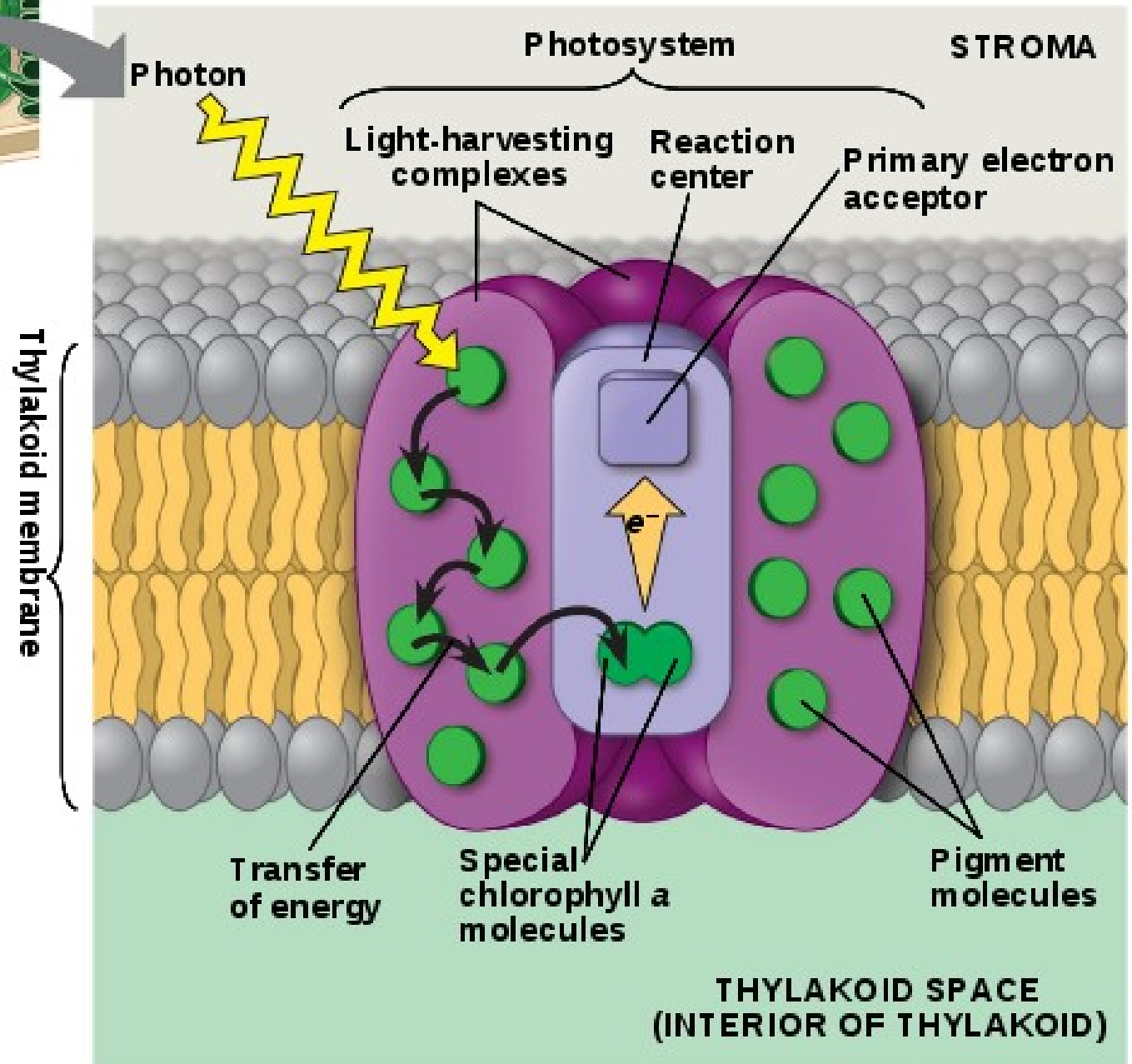
- **pigments antena**: capten l'energia lluminosa i la transmeten a altres pigments.
- **pigments diana**: capten l'energia dels anteriors i aconseguixen que els seus electrons passin a un estat excitat, els transfereixin al primer acceptor d'electrons i són reposats gràcies al primer donador d'electrons.

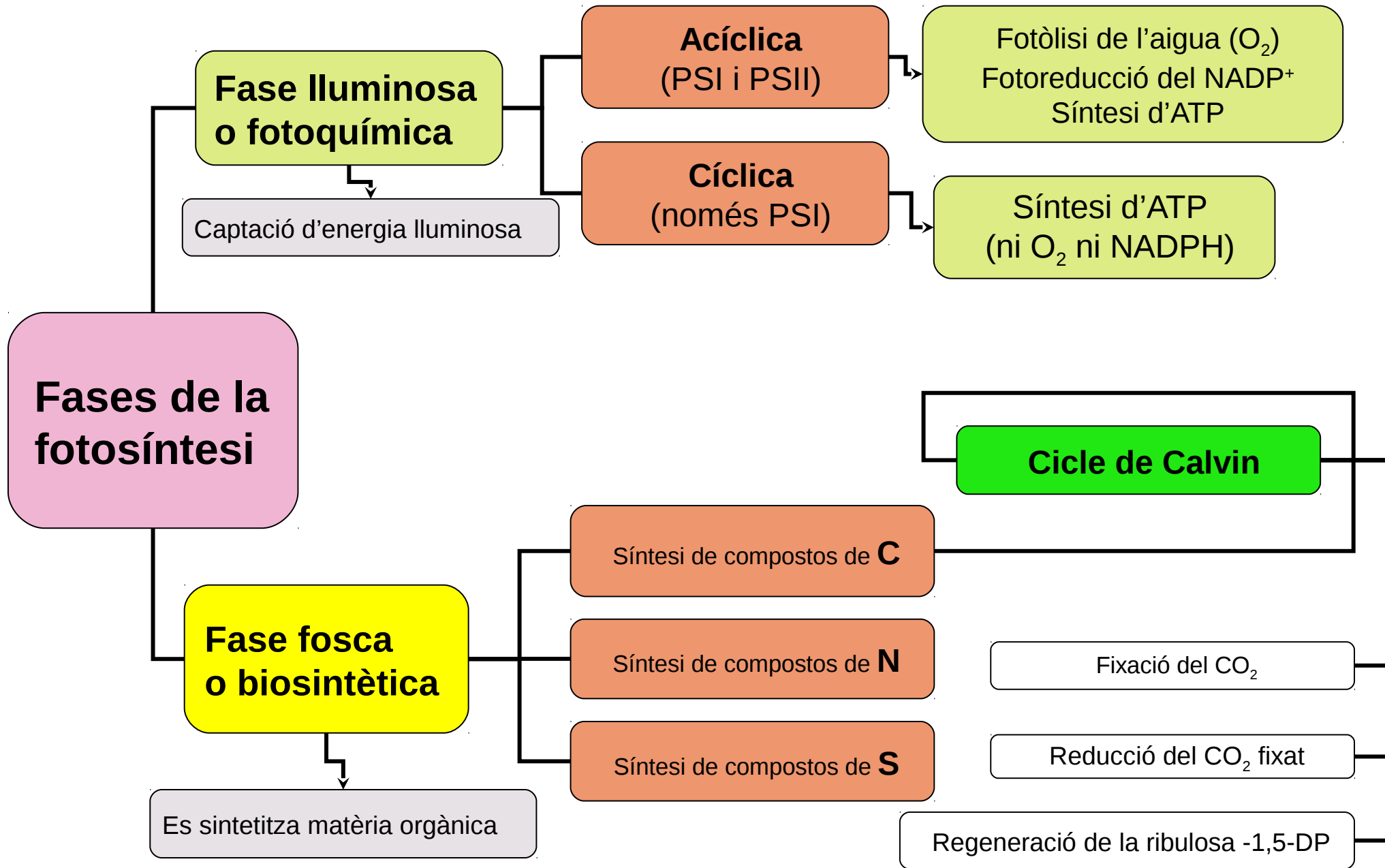
Estructura interna d'un fotosistema



Com capta la llum un fotosistema?

Quan un fotó arriba a una molècula de pigment de l'antena, l'energia passa de molècula a molècula fins que assoleix el centre de reacció. Allí, un electró excitat d'una de les dues molècules de clorofil·la serà capturat per l'acceptor primari d'electrons.





Fase Iluminosa acíclica

En aquesta fase es produeixen els processos següents:

1) Fotòlisi de l'aigua

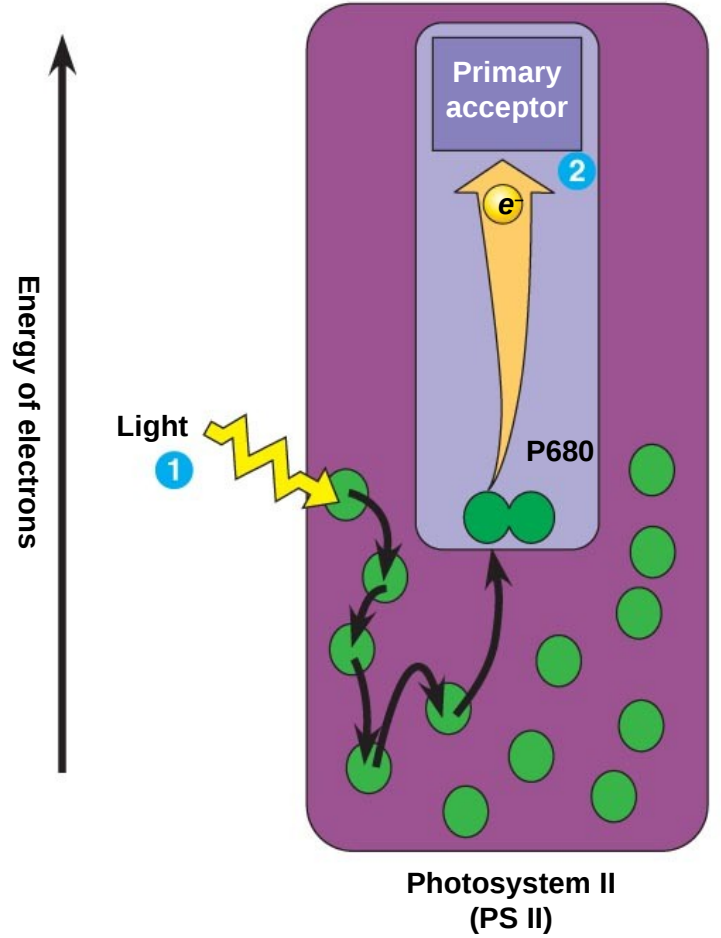
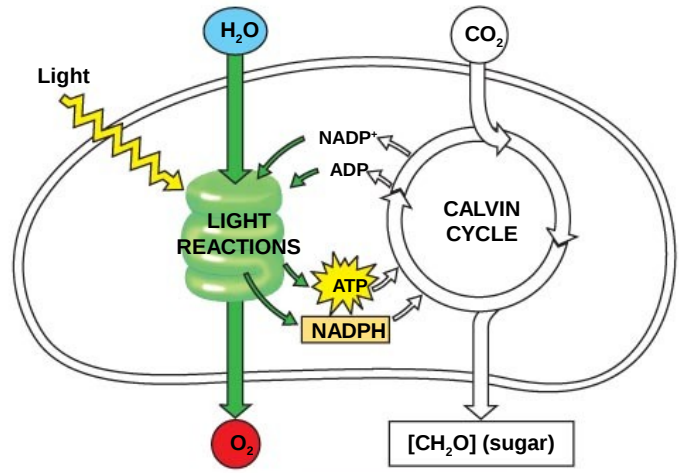


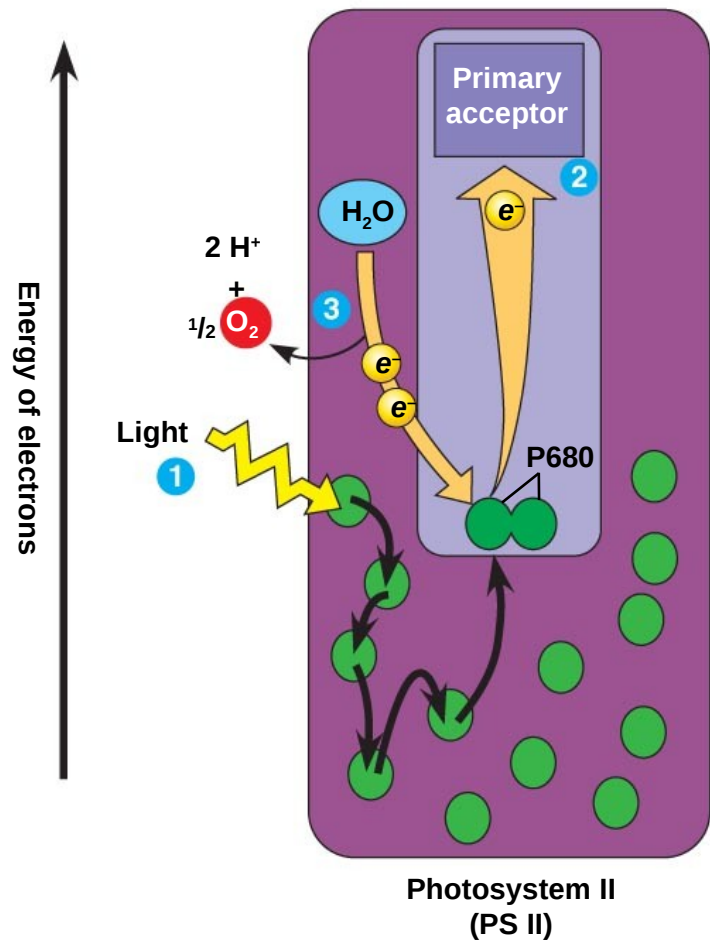
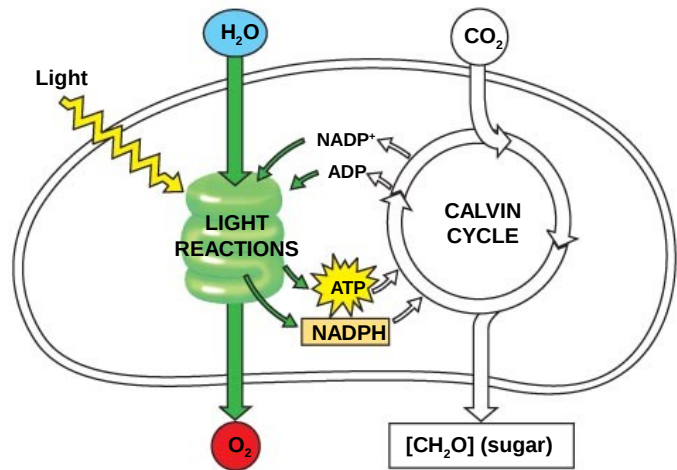
2) Fotofosforilació de l'ADP

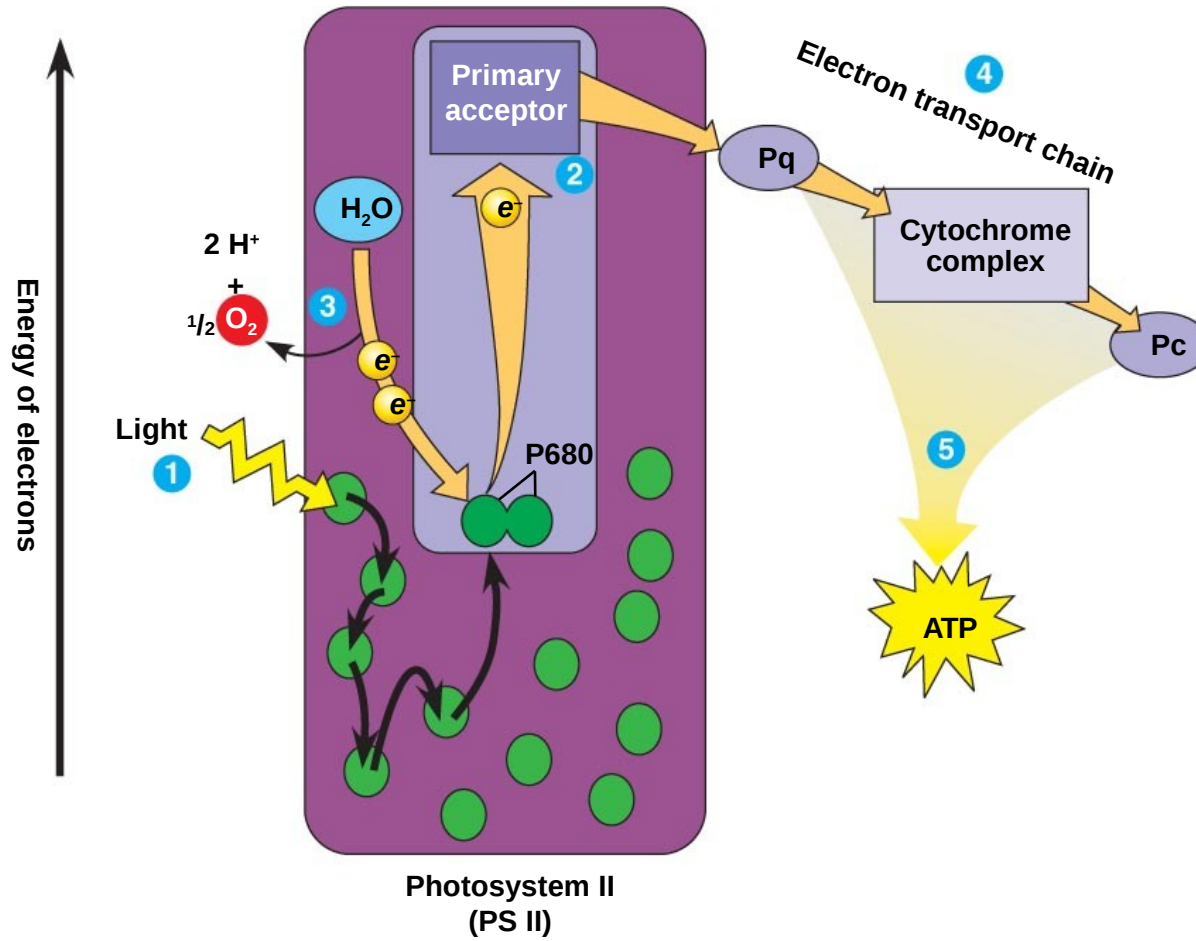
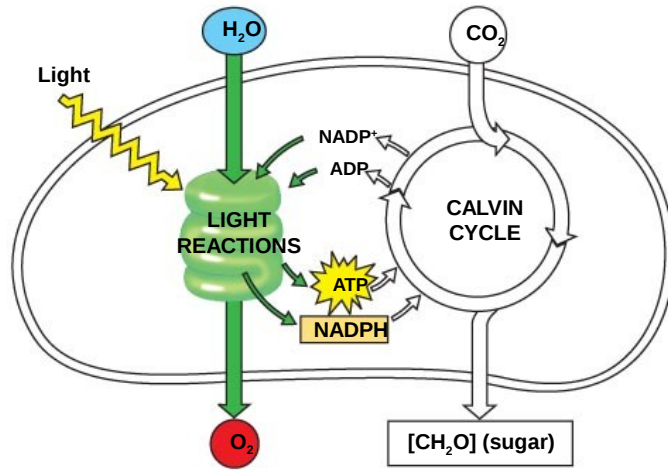


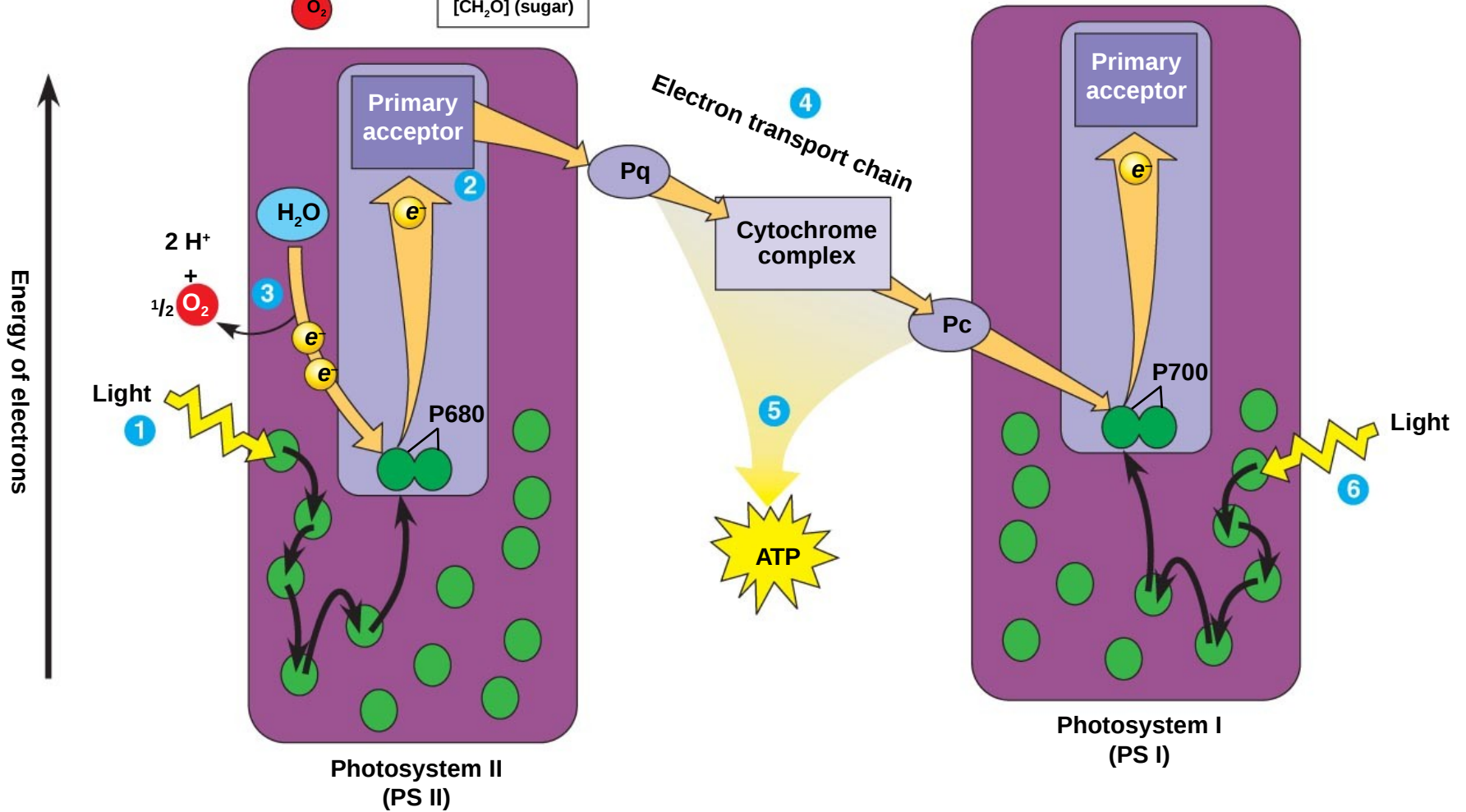
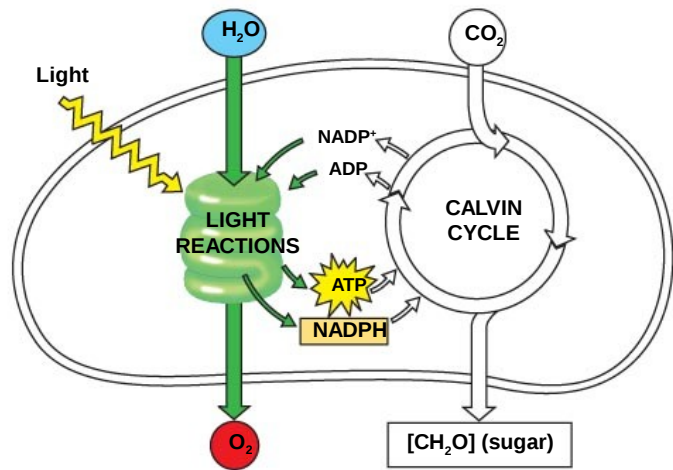
3) Fotoreducció del NADP⁺

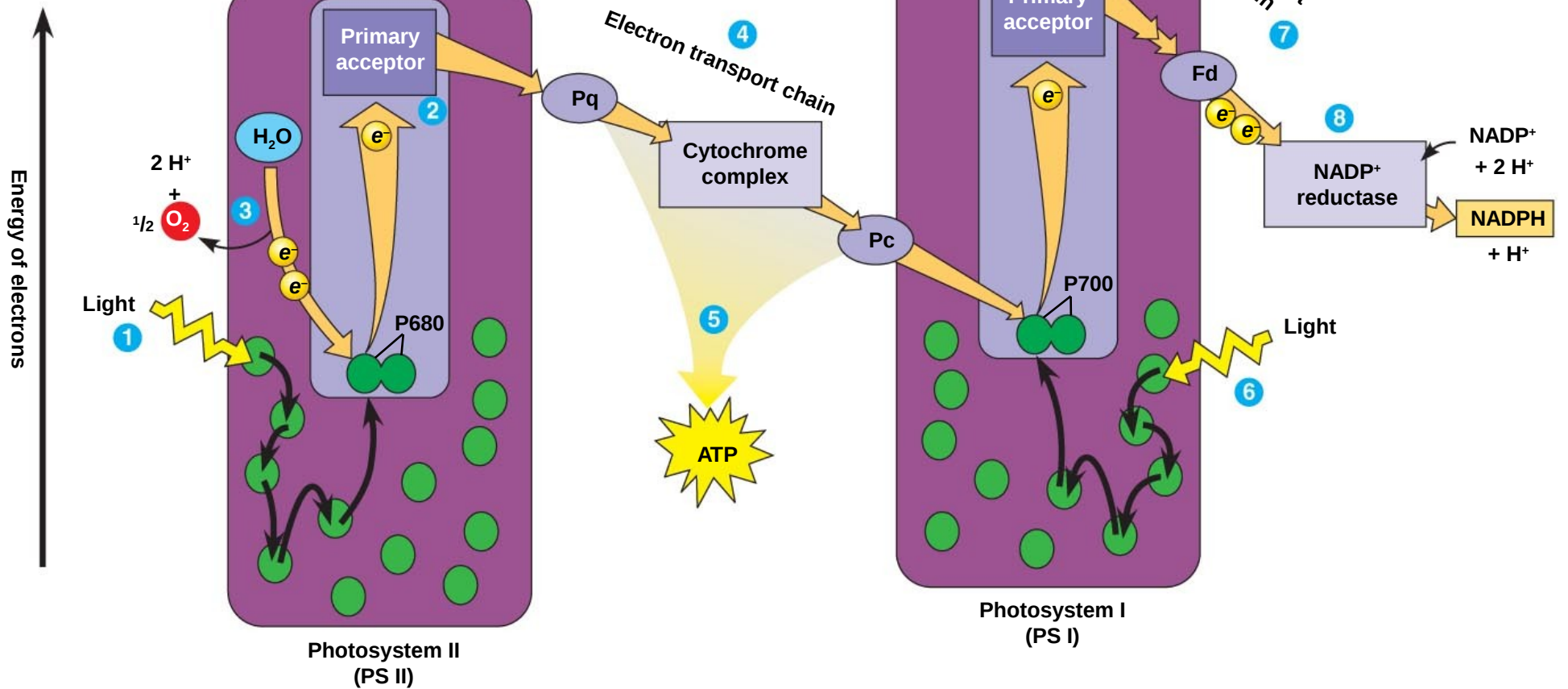
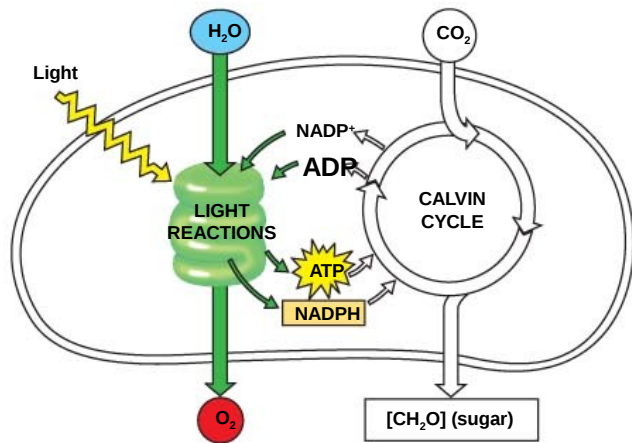


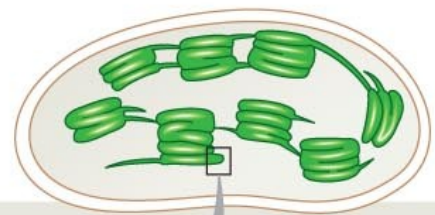
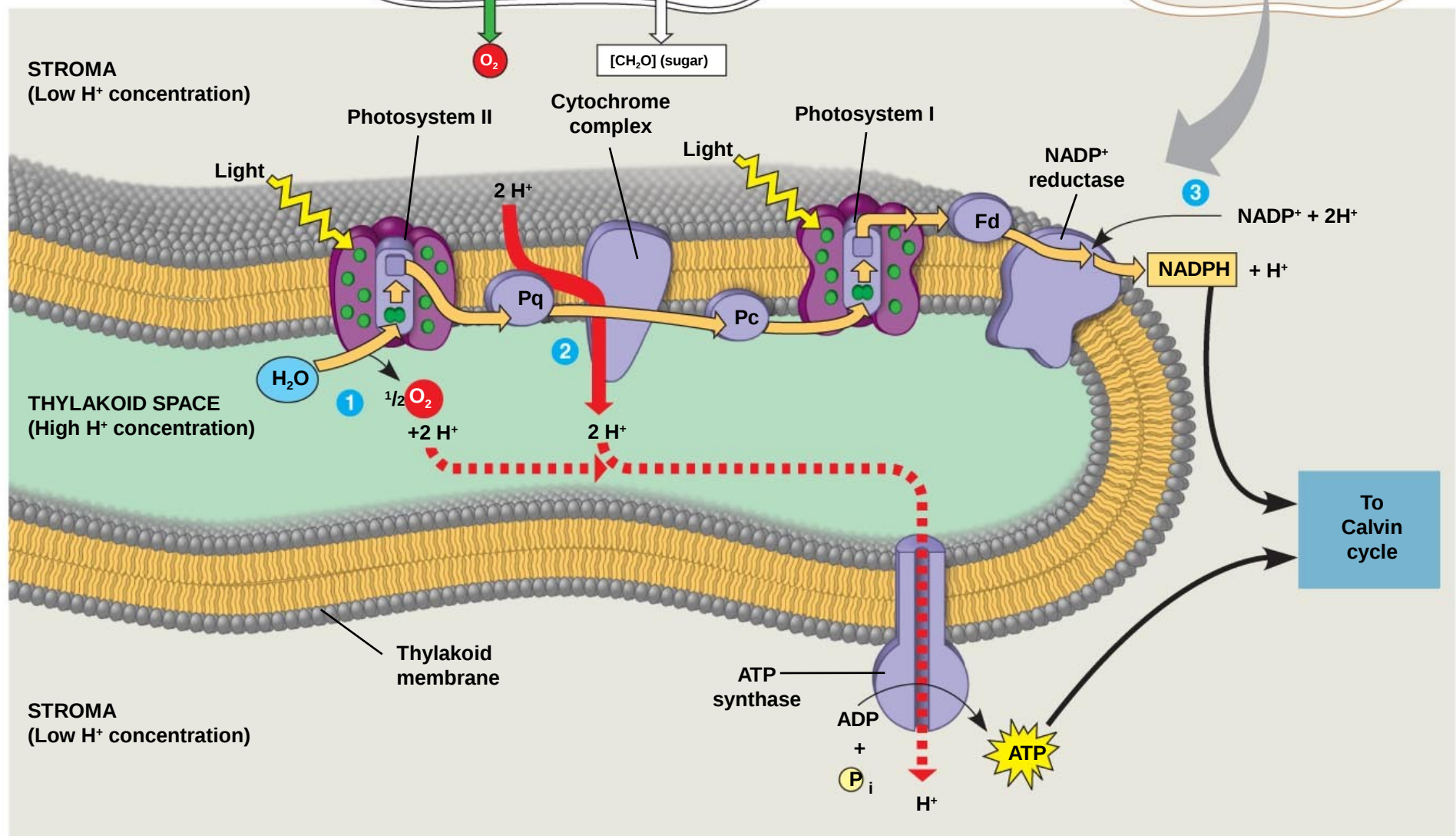
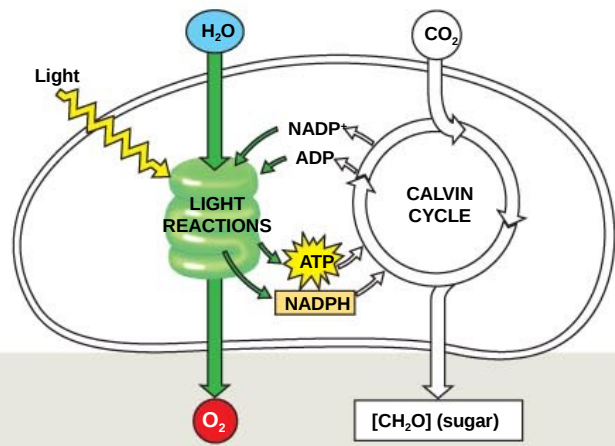




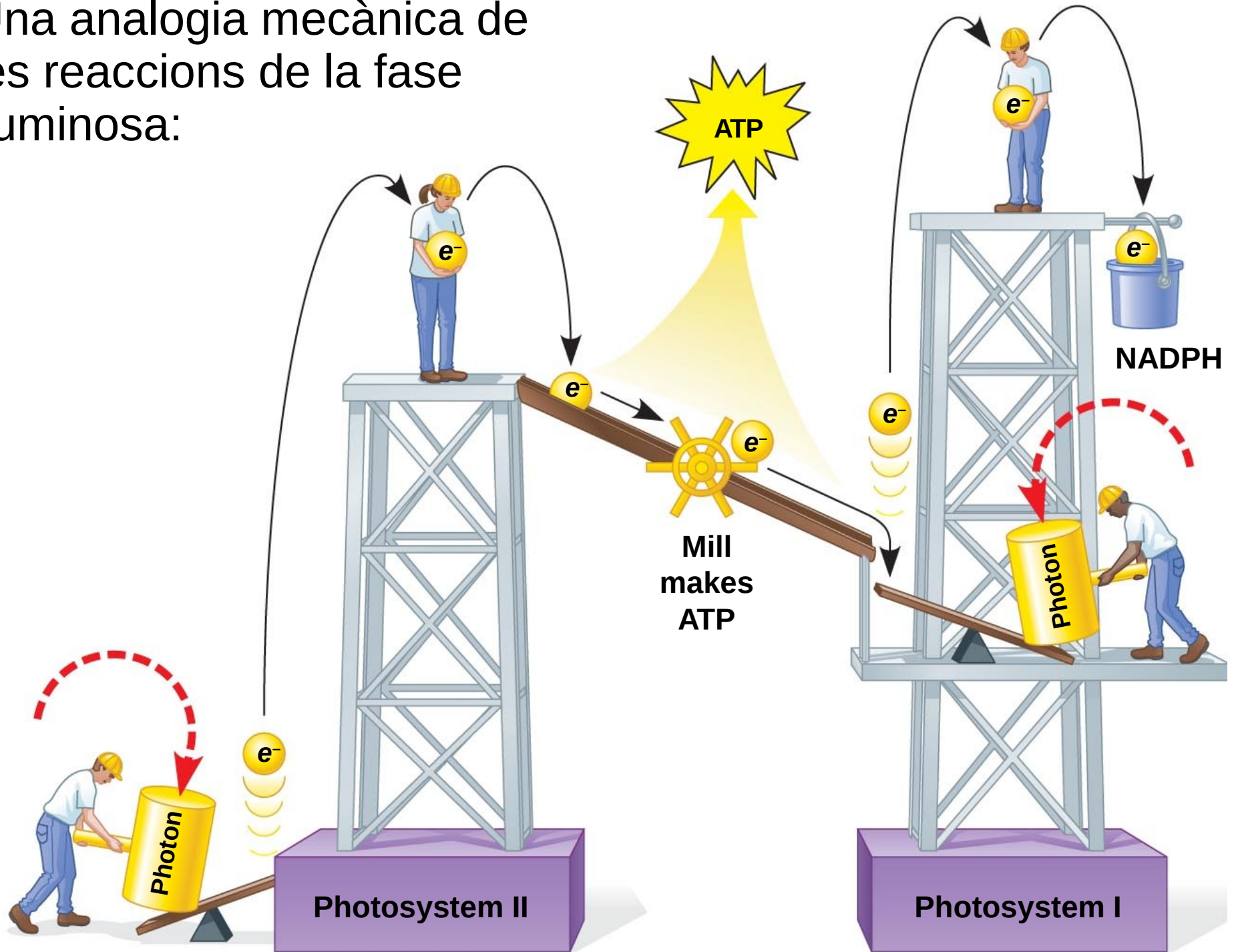




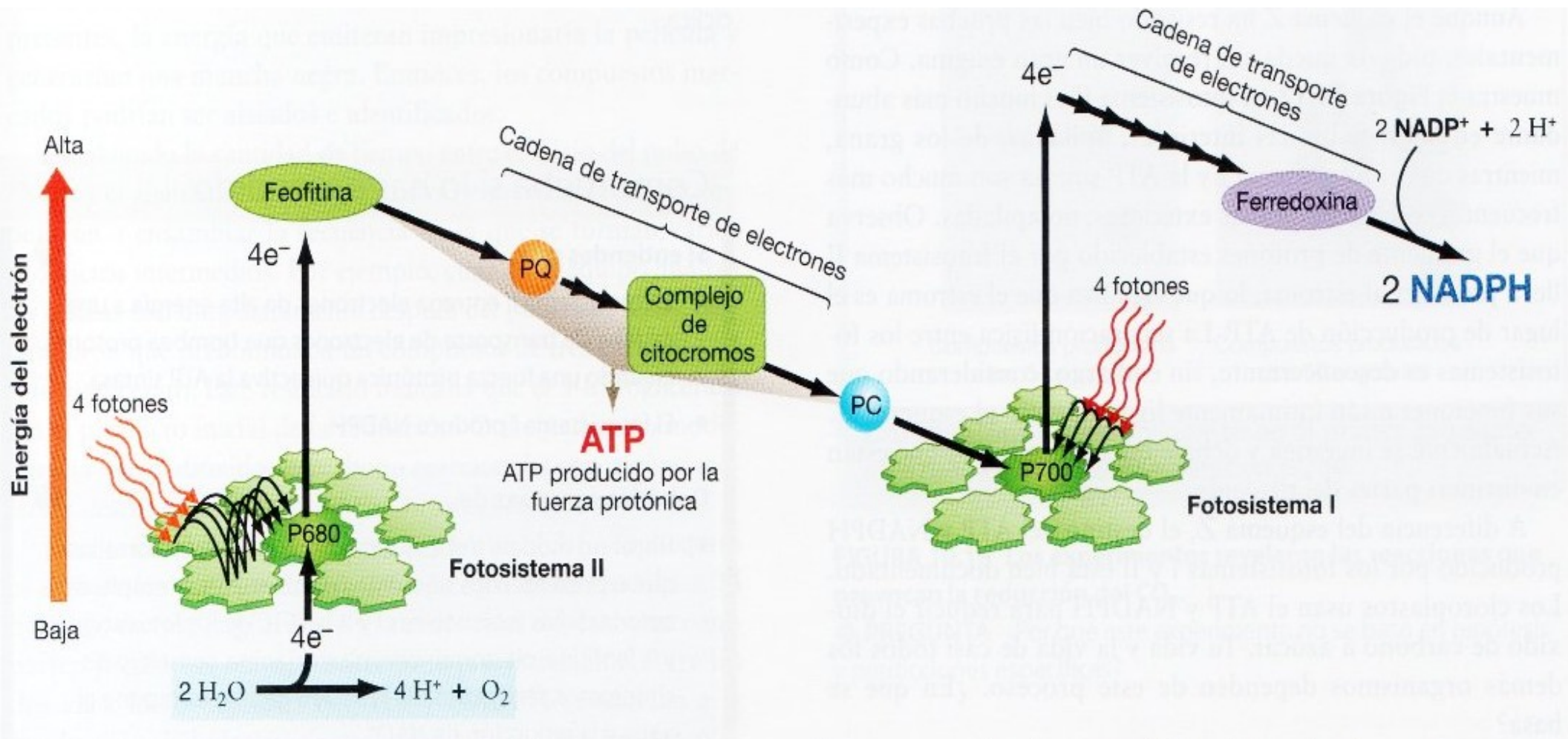




Una analogia mecànica de les reaccions de la fase lluminosa:

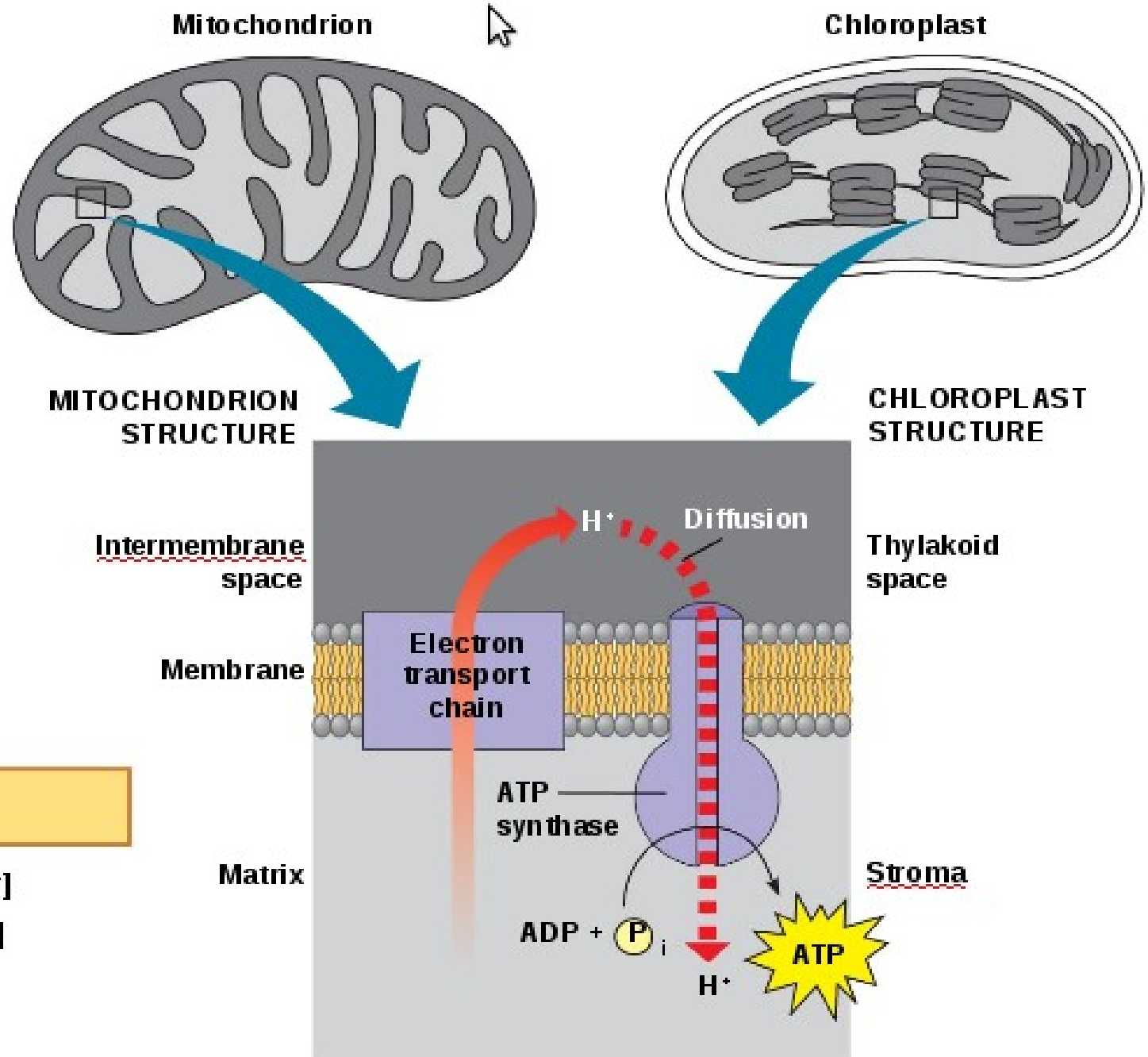


L'esquema Z: els fotosistemes I i II treballen junts



L'esquema Z conecta els fotosistemes I i II. L'esquema Z proposa que els electrons del PSII entren en el PSI, on són promociionats a un estat d'energia suficientment alt com per a possibilitar la reducció del NADP^+

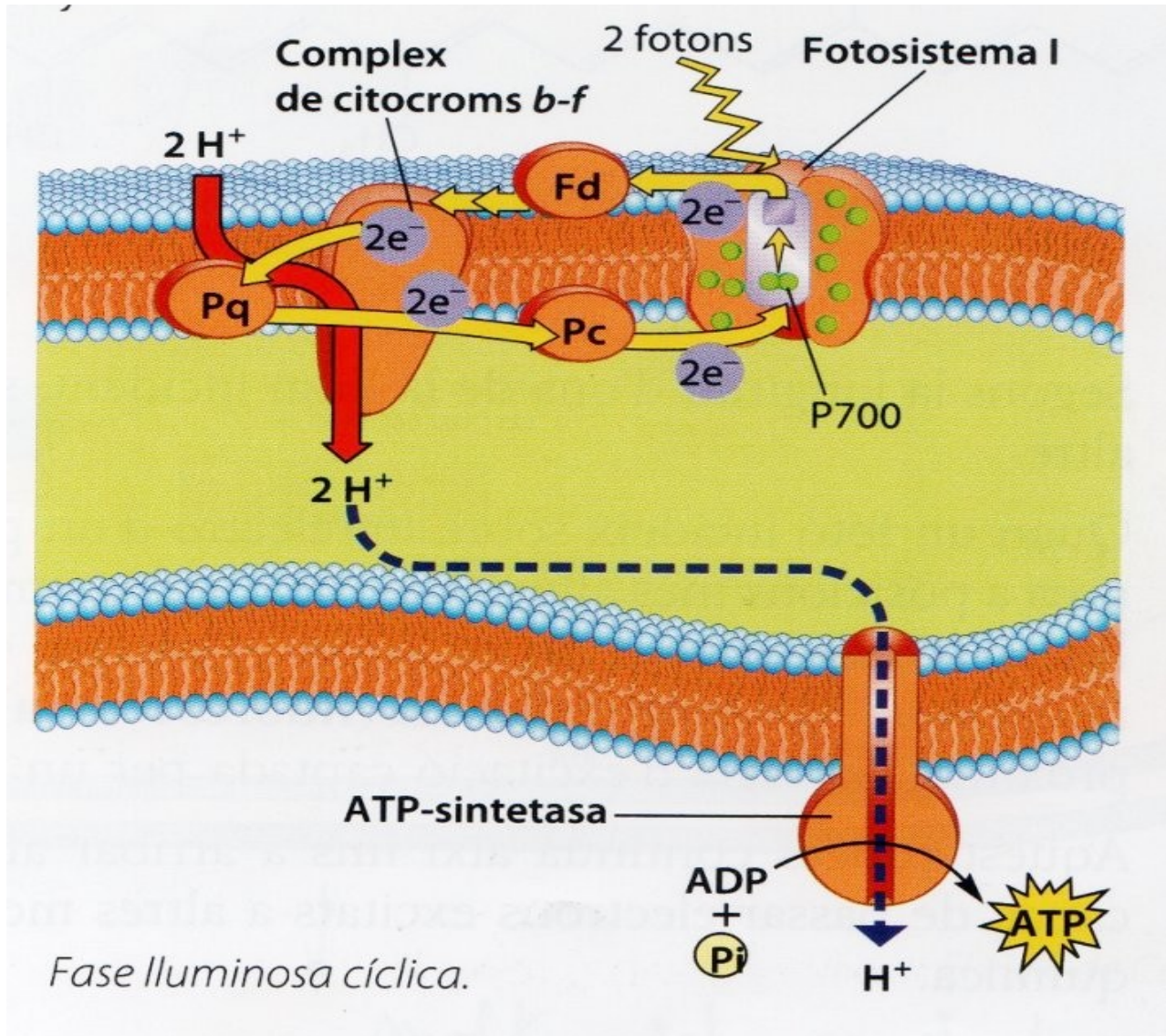
Comparació de la quimioosmosi en els mitocondris i en els cloroplasts

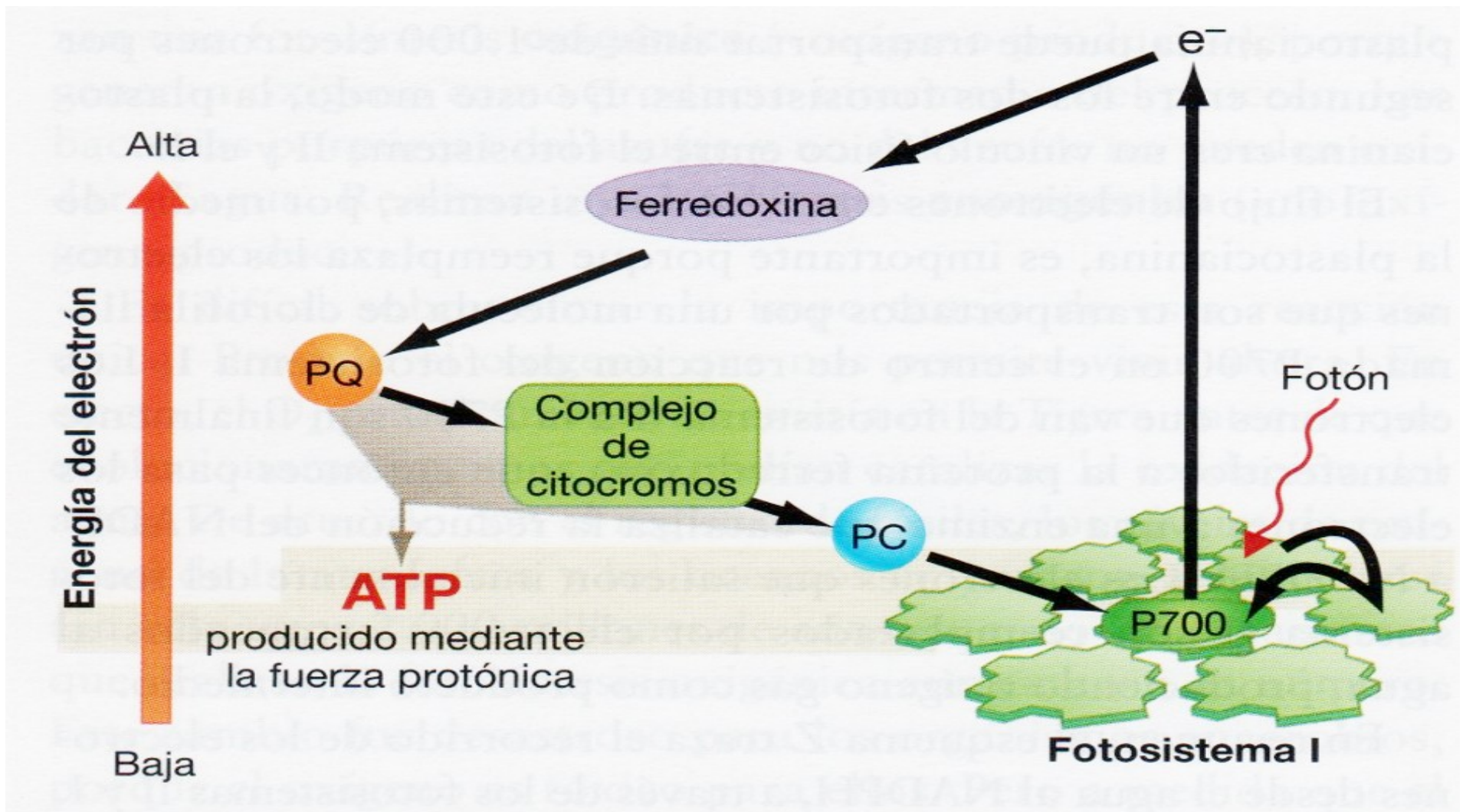


Fase Iluminosa cíclica

En la fase Iluminosa cíclica només intervé el fotosistema I. Es genera un flux cíclic d'electrons que a cada volta només donen lloc a la síntesi d'ATP.

Com que no intervé el PSII, no hi ha fotòlisi de l'aigua, i com a conseqüència, ni es desprèn oxigen ni hi ha reducció del NADP^+ .



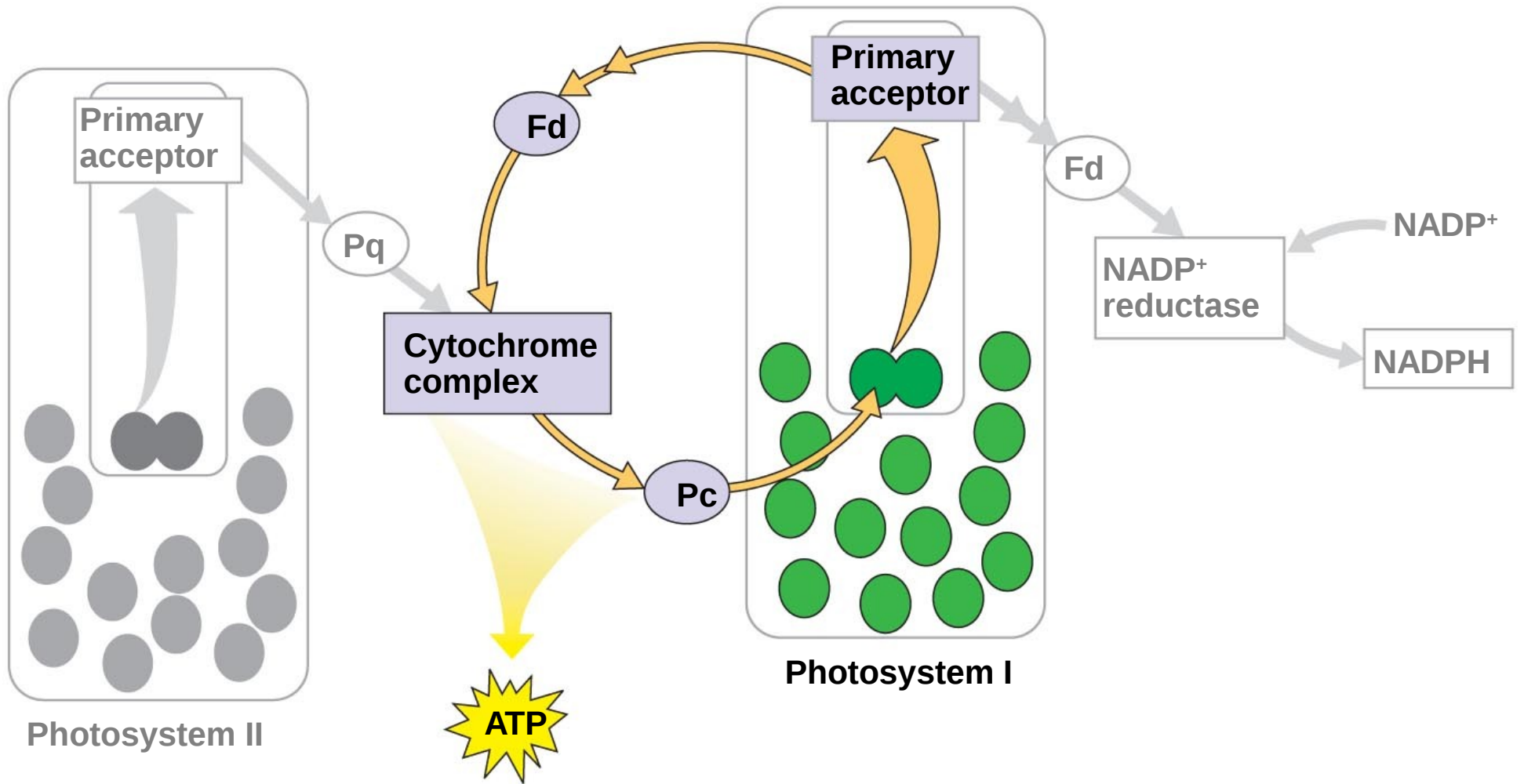


La fotofosforilació cíclica produeix ATP. El transport d'electrons cíclic és una alternativa a l'esquema en Z. En lloc de passar al NADP⁺, els electrons circulen cíclicament pel sistema, i això permet la formació d'ATP adicional mitjançant la fotofosforilació.

Quina és la finalitat del flux cíclic dels electrons?

El flux no cíclic d'electrons, produeix ATP i NADPH en quantitats aproximadament iguals, però el cicle de Calvin consumeix més ATP que NADPH. El flux cíclic completa la diferència, ja que produeix ATP però no NADPH.

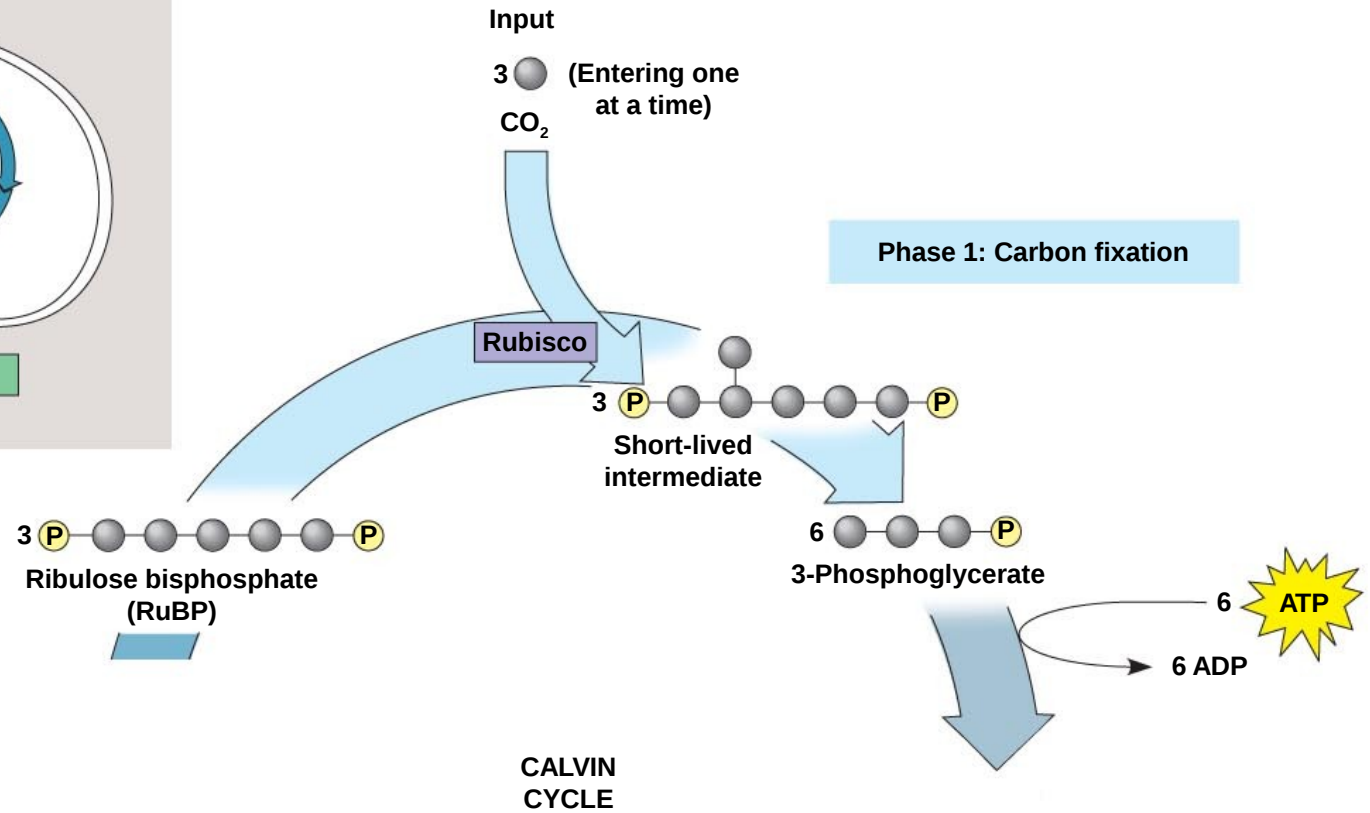
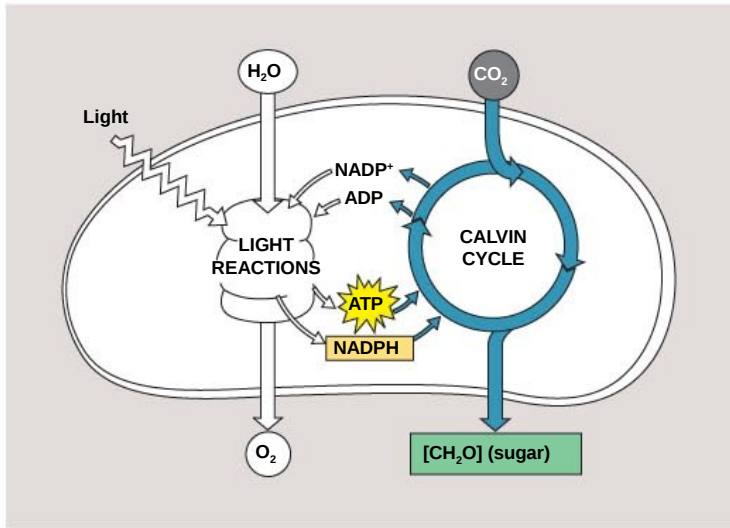
Les concentracions de NADPH en el cloroplast regulen la via, cíclica o acíclica, que segueixen els electrons durant la fase lluminosa. Si al cloroplast se li esgota l'ATP per fer el cicle de Calvin, el NADPH començarà a acumular-se a mesura que el cicle de Calvin disminueix de velocitat. L'augment de NADPH pot estimular un canvi temporal del flux electrònic d'acíclic a cíclic fins que l'aport d'ATP assoleixi el nivell necessari.



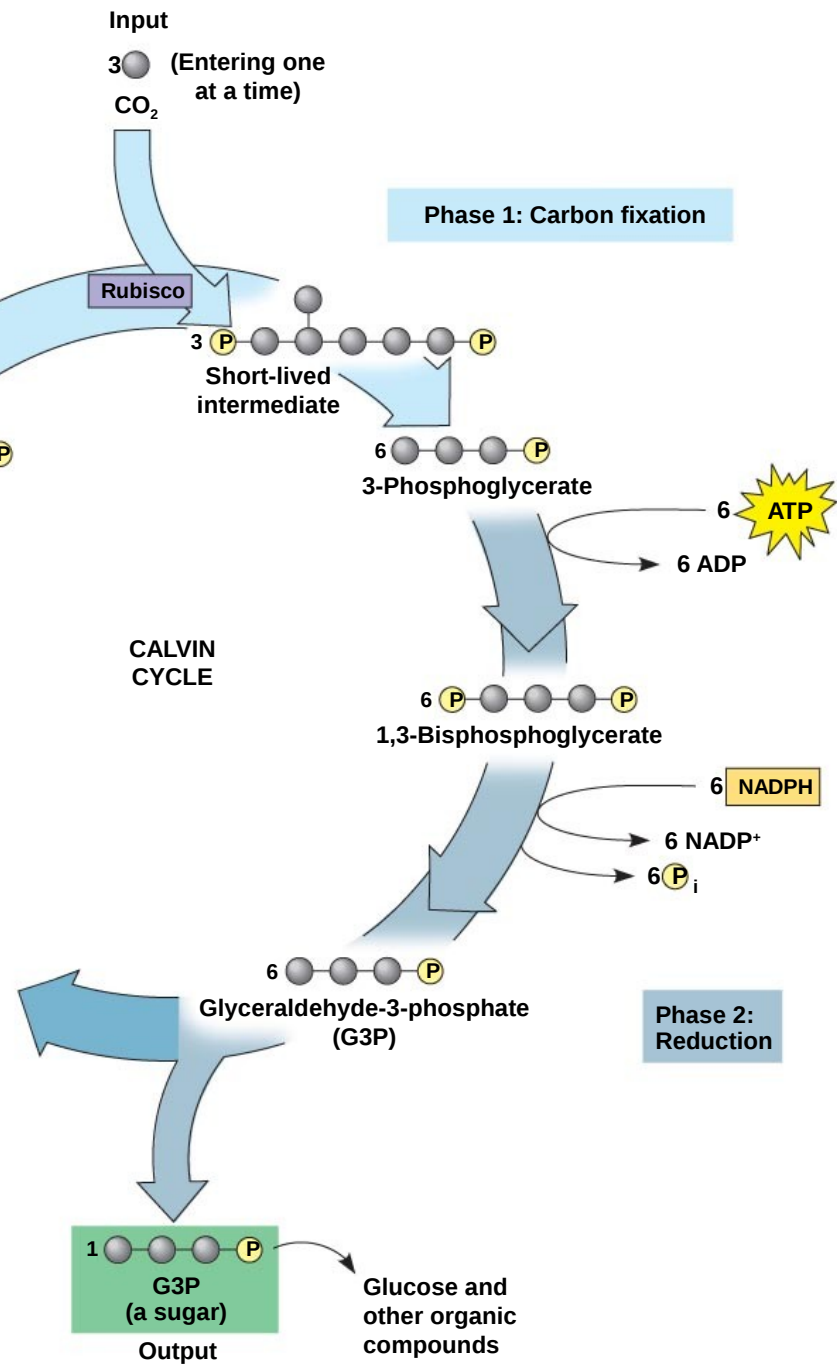
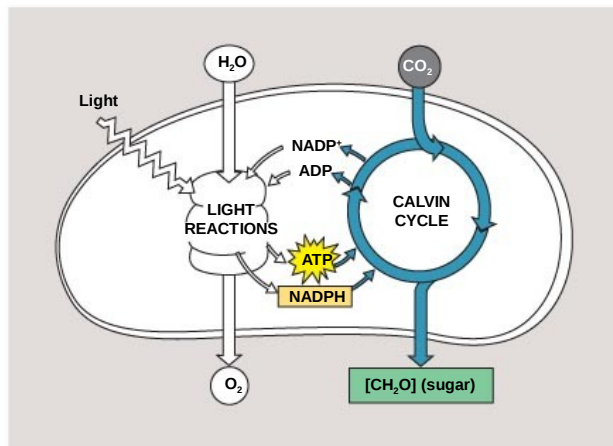
Fase fosca o biosintètica

- El **cicle de Calvin** utilitza l'ATP i el NADPH per convertir el CO₂ en sucres.
- El cicle de Calvin és similar al cicle de Krebs en el sentit que el material de partida és regenerat després que les molècules ingressen i abandonen el cicle. Tot i així, mentre que el cicle de Krebs és catabòlic (oxida la glucosa i allibera energia), el cicle de Calvin és anabòlic: sintetiza sucres a a partir de molècules més petites i consumeix energia.

- El carboni entra al cicle de Calvin en forma de CO_2 i surt en forma de gliceraldehid-3-fosfat (G3P), un sucre de 3 àtoms de C.
- Per a la síntesi neta d'una molècula de G3P, el cicle ha de tenir lloc 3 vegades i fixar 3 molècules de CO_2 .
- El cicle de Calvin es divideix en tres fases:
 - **Fase 1:** fixació del CO_2
 - **Fase 2:** Reducció del CO_2 fixat
 - **Fase 3:** Regeneració de ribulosa 1,5-difosfat.

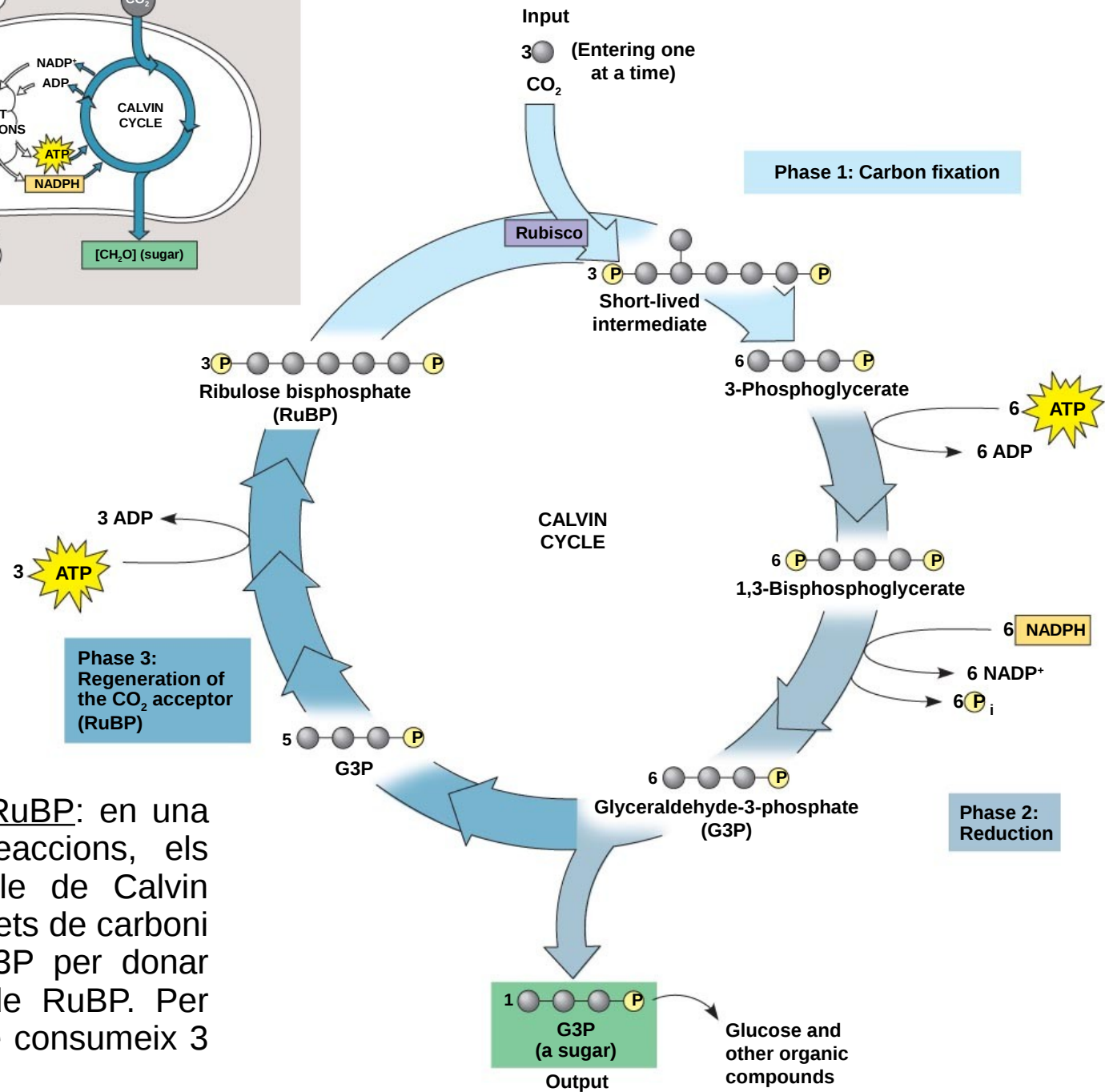
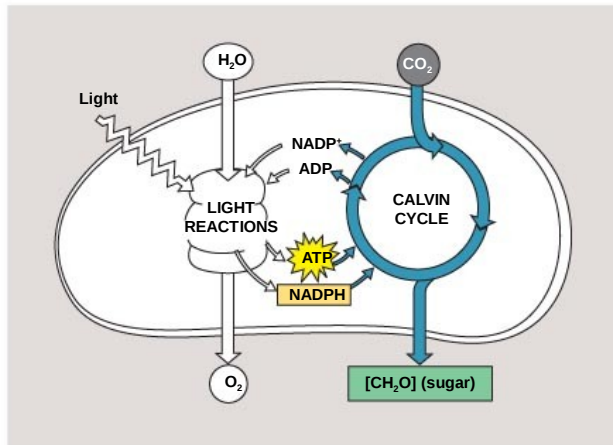


1. Fixació del carboni: el cicle de calvin incorpora $1CO_2$ per volta, unint-lo a una molècula de 5 àtoms de C, la ribulosa bifosfat (RuBP). L'enzim que catalitza aquesta unió és la RuBP carboxilasa o enzim **rubisco** (proteïna més abundant de la Terra). El producte de la reacció és un intermediari de 6 àtoms de C molt inestable que de seguida es dissocia en dos molècules de 3àtoms de C, el 3-fosfoglicerat (dos molècules per cada CO_2)



2. Reducció: cada molècula de 3-fosfoglicerat rep un grup fosfat adicional de l'ATP i es converteix en 1,3-bifosfoglicerat. Després un parell d'e⁻ donats pel NADPH redueix el 1,3-bifosfoglicerat a G3P.

Per cada 3 molècules de CO₂ incorporades es formen 6 G3P, però només una surt del cicle per servir de base per a la síntesi de glucosa i altres compostos orgànics.



3. Regeneració de la RuBP: en una complexa serie de reaccions, els últims passos del cicle de Calvin reorganitzen els esquelets de carboni de 5 molècules de G3P per donar lloc a una molècula de RuBP. Per aconseguir això el cicle consumeix 3 molècules més d'ATP.

